

## 봄철 황사탐지를 위한 정지궤도위성 적외선 채널의 배경경계값 적용 가능성 연구

홍성재\* · 김재환\*<sup>†</sup> · 하종성\*\*

\*부산대학교 대기과학과, \*\*한국항공우주연구원 나로우주센터 기술관리팀

### Possibility of Applying Infrared Background Threshold Values for Detecting Asian dust in Spring from Geostationary Satellite

S. J. Hong\*, J. H. Kim\*<sup>†</sup>, and J. S. Ha\*\*

\*Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Korea

\*\*Launch Operation Department of Naro Space Center, Korea Aerospace Research Institute

**Abstract** : There has been an increasing trend in damaging by the Asian dust in spring. The continuous monitoring of the dust event with IR channels in geostationary satellite is very useful for forecasting and preventing the event. However, the monitoring with the IR channels revealed various problems associated with sensitivity. To eliminate these problems, we introduced a new concept of monitoring by constructing the background threshold values (BTV) and aerosol index (AI). This paper is about to test the reliability of this concept by applying to geostationary satellite, MTSAT-1R.

**Key Words** : Asian dust, satellite remote sensing, IR dust monitoring, Brightness temperature difference.

**요약** : 최근 황사에 의한 피해가 증가하고 있는데, 정지궤도 위성에 탑재된 적외 채널은 주야간의 연속적인 관측을 가능하게 하여 황사 예보와 이로 인해 발생할 수 있는 피해를 미리 예방하는데 큰 도움을 준다. 그러나 적외 채널을 이용한 황사 측정 방법에는 많은 문제점들이 있다는 것이 알려져 있다. 이런 문제점들을 해결하기 위해 본 연구에서는 적외 채널의 배경경계값과 황사지수 개념을 도입하여 이를 정지궤도 위성에 적용한다면 황사 측정 결과를 크게 개선할 수 있음을 밝혀냈다. 본 연구는 이러한 개념을 정지궤도 위성인 MTSAT-1R에 적용하여 개선된 황사 측정 방법에 대해 연구하였다.

## 1. 서론

황사(Asian dust)는 먼지연무의 일종으로서 중국의 타클라마칸 사막, 오르도스 사막, 황토고원, 만주지역과 몽고의 고비사막이 발원지역이다(Lino *et al.*, 2004). 황

사는 봄에 가장 빈번하게 발생하며(Zhao *et al.*, 2007) 동아시아 지역은 물론 태평양을 건너 아메리카 대륙의 서안 지방까지 영향을 미치는 경우도 있다(Jaffe *et al.*, 1999; McKendry *et al.*, 2001). 이 과정에서 오염물질도 같이 수송되며(Xiao *et al.*, 1997; Berntsen *et al.*,

접수일(2010년 1월 4일), 수정일(1차 : 2010년 7월 19일), 게재확정일(2010년 8월 14일).

<sup>†</sup> 교신저자: 김재환(jaekim@pusan.co.kr)

1999), 2000년 이후 발생 빈도도 높아지고 있고 (Takemura *et al*, 2002) 인체의 호흡기와 공업제품에 흡입되어 큰 문제를 일으킨다(Liu and Smith, 1995; Monn *et al*, 1997; Kwon *et al*, 2002; Huang *et al*, 2007). 뿐만 아니라 에어로솔은 기후변화에도 큰 영향을 미치므로(Saxena *et al*, 1997) 사회적인 관심과 국제적인 조사가 필요하다. 특히 한국 환경정책평가연구원은 2005년 발표를 통해 황사로 인해 한국에서는 한해 최대 181만 7천여명이 병원치료를 받고 165명이 사망한다고 하였으며 임영욱과 정용(1989)은 황사에 의한 피해가 한해 최대 7조 3천억여원에 이른다고 밝혔다.

황사의 피해를 예방하고 대처하기 위해서는 황사의 관측이 필수적으로 요구되어진다. 황사는 지상과 위성에서 탐지되는데 지상에서의 탐지는 정확도가 높고 물리·화학적인 특성에 대한 상세한 정보를 얻을 수 있으나 지역 규모의 분포와 이동을 파악할 수 없어 시·공간적인 분해능이 뛰어난 위성을 이용한 황사탐지가 필요하다. 위성을 이용한 황사 탐지는 황사의 공간적 분포와 이동방향에 대한 정보를 얻기에 용이하다.

위성을 이용한 황사와 같은 에어로솔 측정은 대부분 가시영역의 파장대를 이용하여 측정해오고 있다. 그러나 지표면 반사도가 높은 육지의 경우 에어로솔 측정에 어려움이 있으며, 측정에 필요한 파장대가 대부분 근적외선에 탑재되어있기 때문에 연속적인 관측이 필요한 황사예보에 적용하는 것이 어렵다. 반면 정지궤도 위성은 연속적인 관측이 가능하여 황사의 이동 경로에 대한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있어 황사예보에 효과적으로 사용이 가능하다. 정지궤도 위성에 탑재된 가시채널의 경우 채널수가 하나밖에 없고 낮은 분광분해능을 가지고 있으며 야간 관측이 불가능하기 때문에 황사 탐지에 제한적이다. 적외 채널을 이용한 에어로솔 탐지는 사용되는 파장대가 에어로솔 크기보다 길어 효과적이지 못하다. 그러나 입자가 상대적으로 큰 광물성 에어로솔(mineral dust)과 화산재 에어로솔의 경우 소광계수가 크기 때문에 적외 채널을 이용한 탐지가 가능하다(Ackerman *et al*, 1994).

적외채널을 이용한 광물성 에어로솔탐지는 11과 12  $\mu\text{m}$  채널의 밝기온도 차이(Brightness Temperature Difference, 이하 BTD)를 이용하여 Prata(1989)에 의해 처음으로 시도되었다. 이 방법은 수증기와 황사입자

가 11과 12  $\mu\text{m}$  파장대에서 흡수계수가 다르다는 원리를 이용한 것이다. 황사의 주 성분인  $\text{SiO}_2$  입자의 방출율은 8.0 ~ 9.7  $\mu\text{m}$  파장에서 최소값을 보이며 점점 증가하여 12 ~ 13  $\mu\text{m}$  파장에서 최대값을 지닌다(Vickers and Lyon, 1967). 이러한 성질에 의해 황사 지역에서는 11  $\mu\text{m}$  파장에 더 많은 흡수를 일으켜 BTD는 음의 값을 가진다. 구름이나 수증기의 경우 12  $\mu\text{m}$ 이 11  $\mu\text{m}$  보다 흡수가 커서 BTD는 양의 값을 갖는다(Prata, 1989; Gu *et al*, 2003). Wen과 Rose(1994)는 AVHRR의 11과 12  $\mu\text{m}$  두 채널을 사용하여 화산재 에어로솔의 측정하였고 Gu *et al*(2003)은 이 방법을 MODIS에 적용하여 중국 북부지방에서 발생하는 황사 탐지에 사용하였다.

그러나 이 방법을 사용한 황사탐지방법은 몇 가지 문제점이 존재한다. 적외선 파장대는 지표의 특성에 의해 발생하는 방출율, 온도, 태양과 위성의 천정각, 수증기량 등에 영향을 받는다(하중성 등, 2006). 이러한 오차 유발요인들을 적절히 제거하지 못한다면 BTD를 이용한 황사탐지에 오차가 생긴다. 본 연구에서는 이러한 인자들 때문에 발생하는 오차를 줄이고 민감도를 높이기 위해 BTD의 배경경계값(Background Threshold Value)이라는 새로운 개념을 도입하였고 이 개념이 BTD 방법에 적용 가능한지를 연구하였다.

본 연구에서는 MTSAT-1R 위성에서 관측된 자료를 사용하였다. 이 위성은 동경 140도 적도 상공에 위치하고 있으며 가시영역에 1개, 적외영역에 4개의 채널이 있다. 적외 채널인 11과 12  $\mu\text{m}$  두 채널의 level-1b 밝기온도 자료를  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 로 격자화 하였다. 검증을 위해 사용된 자료는 OMI(Ozone Monitoring Instrument)에서 산출된 AI(Aerosol Index)이다. 자외선에 흡수가 일어나는 광물성 먼지와 생태계 화재로 발생하는 에어로솔만 탐지가 가능하여 이 자료는 황사의 검증 자료로 매우 효과적이다.

## 2. 방법

Fig. 1은 2008년 3월 1일과 2일 MTSAT-1R에서 관측된 자료에 BTD 방법을 적용하여 구한 분포도다. BTD는 음의 절대값이 클수록 강한 황사를, 양의 값을 가지면 구름임을 나타낸다. 이 그림에서 BTD 방법의 문

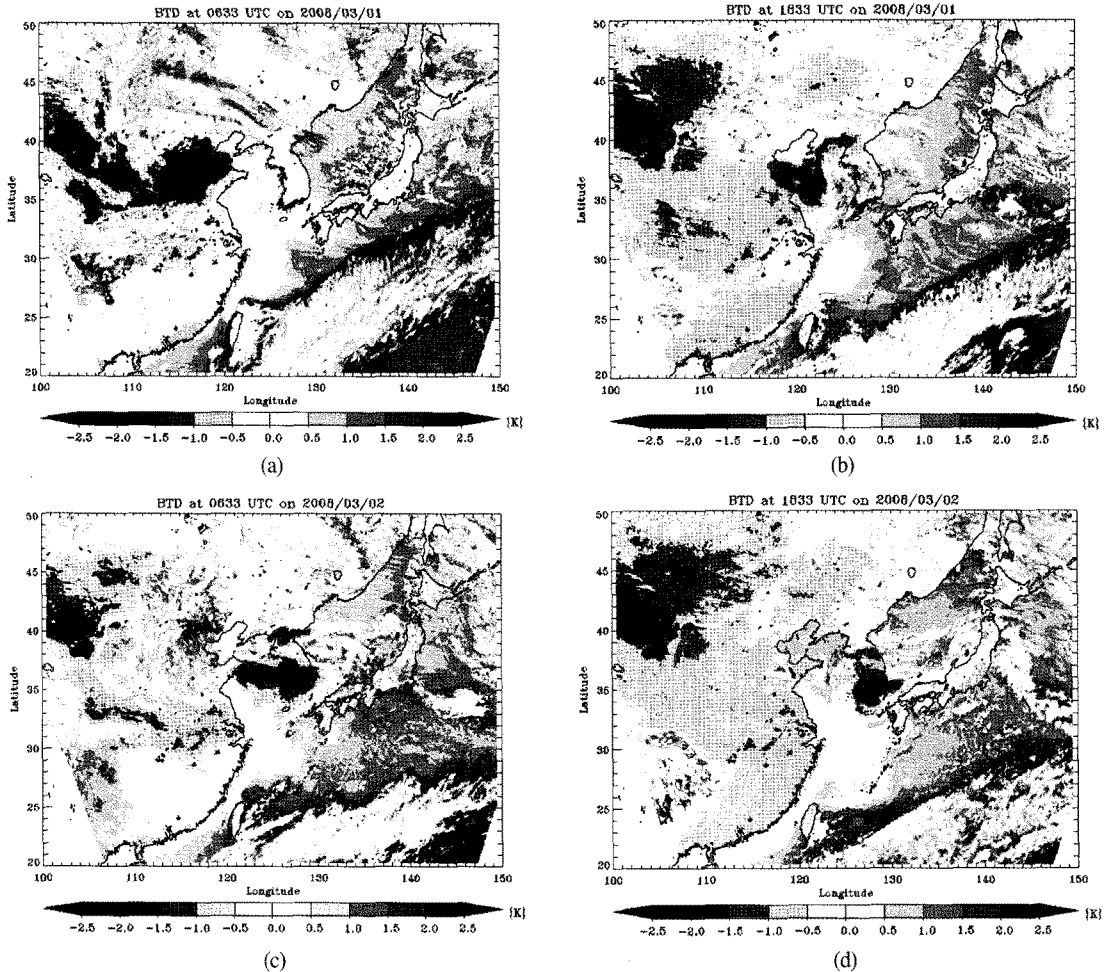


Fig. 1. BTD between 11 and 12 $\mu$ m at 15:33 KST (day) on 1 (a) and 2 (c) March 2008. The same as (a) and (c) at 03:33 KST (night) on 1 March 1 (b) and 2 (d) 2008.

제점으로 판단되는 것들이 보인다. 첫 번째, 육지에서 관측된 BTD의 경우 밤에 관측된 값이 낮에 관측된 값보다 작다. 특히, 야간의 경우 구름이 존재하는 지역을 제외한 육지의 대부분 지역에서 황사가 존재하고 있는 것 같은 오류를 발생시키고 있다. 두 번째, 바다와 육지의 경계선을 따라 BTD값이 불연속성을 보인다. 이것은 육지와 바다의 표면특성과 수증기량의 차이에 의한 것으로 보인다. 세 번째, 중국의 내륙지역인 황토고원 부근에서 고정적으로 낮은 BTD값이 관측되어 황사가 항상 존재하는 것같이 보인다. 황사는 바람에 따라 움직이기 때문에 고정적인 황사 분포를 보여주는 것은 사막 지역의 지표면 특성에 의해 발생된 것으로 보인다.

가시광선을 이용하여 에어로솔을 관측하는 경우 방

법에 따라 차이는 있지만, 기본적으로 관측 당일 각 화소의 반사도에서 지난 일정기간 동안 각 화소별로 산출된 청정 화소의 배경반사도(Background Albedo)를 빼줌으로서 에어로솔 지수를 산출한다. 이 경우 배경반사도는 관측일 이전 한달 이상의 자료 중 각 화소별 반사도가 가장 적은 값이 선택되어진다(Hauser *et al*, 2005). 이와 같은 개념을 이용하여 적외 채널에도 청정 화소에서 방출될 밝기온도의 배경경계값을 산출할 수 있다면 이 값을 관측일의 BTD에서 빼 주어 적외 채널의 밝기온도에 영향을 주는 인자들이 제거된 BTD를 산출할 수 있다.

이러한 방법을 적용하기 위해서는 가시광선과 마찬가지로 적외선만으로 청정 화소를 정의할 수 있어야 한

다. 맑은 날 주간의 경우, 지표면에 도달하는 태양복사 에너지량이 많기 때문에 지표면의 온도가 구름 상부의 온도보다 높다. 야간의 경우 복사냉각으로 인해 온도가 떨어지나 구름 상층부보다 온도가 높다. 그러므로 일정 기간동안 최대밝기온도를 가진 날을 청정한 날이라고 정의할 수 있다. 그러나 역전층이 존재하는 경우 구름 상층부의 온도가 높을 수도 있다. 하지만 황사는 지표에 강한 바람이 불며 경압불안정이 발생하는 늦겨울에서 초봄에 주로 발생하며, 한랭전선 후면 한 지역에서 발생하므로 따뜻한 지면 위로 찬 공기가 통과되어 역전층의 발생 빈도가 낮다(Chun *et al*, 2001). 그러므로 청정한 경우의 밝기온도는 구름이 존재하는 경우보다 높다. 또한, 대기창 영역에서 11  $\mu\text{m}$  채널이 12  $\mu\text{m}$  보다 수증기에 대해 영향을 적게 받기 때문에 11  $\mu\text{m}$  채널의 밝기온도를 이용하여 위에 제시된 방법으로 청정한 날을 찾을 수 있다.

청정한 날의 배경경계값 산출을 위해 사용될 자료의 기간을 정해야 한다. 가시광선의 경우 한달 정도의 자료를 사용하였지만 적외선의 경우 지표 상태와 대기 중 수증기량에 따라 크게 변할 수 있기 때문에 이보다는 짧은 기간이 요구된다. 그러나 이 기간이 너무 짧으면 구름의 영향으로 청정 화소의 빈도수가 너무 작아 배경경계값이 산출되지 않는 화소가 생길 수 있다. 본 연구에서 기온의 연속성을 고려하여 여러 기간을 선정하여 분석한 결과 관측 당일을 포함한 10일간의 동안의 자료를 이용할 경우 문제점이 최소화 되었다. 즉, 배경경계값은 10일간 각 화소에서 11  $\mu\text{m}$  채널의 밝기온도가 최대값을

보일 때의 그 화소의 BTD로 정의된다.

주어진 기간 동안 구름이 존재하는 경우는 맑은 경우보다 온도가 낮기 때문에, 주어진 화소에서 최대밝기온도가 관측된 날을 청정한 날로 정의하여 배경경계값을 산출한다. 이론적으로는 청정할 때의 관측값이 배경경계값으로 산출된다. 그러나 청정한 날로 선정되어 배경경계값을 산출하였다더라도 그날 수증기가 많이 존재했을 경우 배경경계값이 양의 값을 가질 수 있다(Yu *et al*, 2002). 특히, 수증기가 많은 해양지역에서 이런 경우가 많이 관측되었는데 배경경계값이 1.0 이상이 산출되는 경우가 많았다. 또한 해양의 경우 10일동안 계속해서 구름이 존재하는 경우가 관측되었으며, 해수면 온도가 높은 날 낮은 구름이 존재하는 경우 해수면 온도가 낮은 맑은 날 보다 온도가 높은 경우가 발생하는 경우가 있었다.

이런 경우 배경경계값이 양수가 되어 BTD 보정시 양의 배경경계값을 빼 주어 청정 화소에서도 황사신호가 나타날 수 있다. 배경경계값을 산출하는데 이러한 이에 대한 영향을 제거한 후 산출되어야 한다. 적외선 채널을 이용하여 구름화소를 제거하기 위해, 사막을 제외한 육지와 해상에서 각각 주어진 10일간 전 화소의 BTD를 평균하였다. 구름의 경우 BTD 평균값보다 높고 청정화소의 경우 작다. 그러므로 이 평균값 이상인 경우 구름으로 정의하였다.

2008년 3월 1일의 경우 주어진 기간 동안 육지에서는 -0.1, 해양에서는 0.9이 BTD의 평균값으로 산출되었으며 이 값 이상의 BTD를 나타내는 경우는 제거한 후 배경경계값을 산출하였다. Fig. 2는 이러한 방법으로

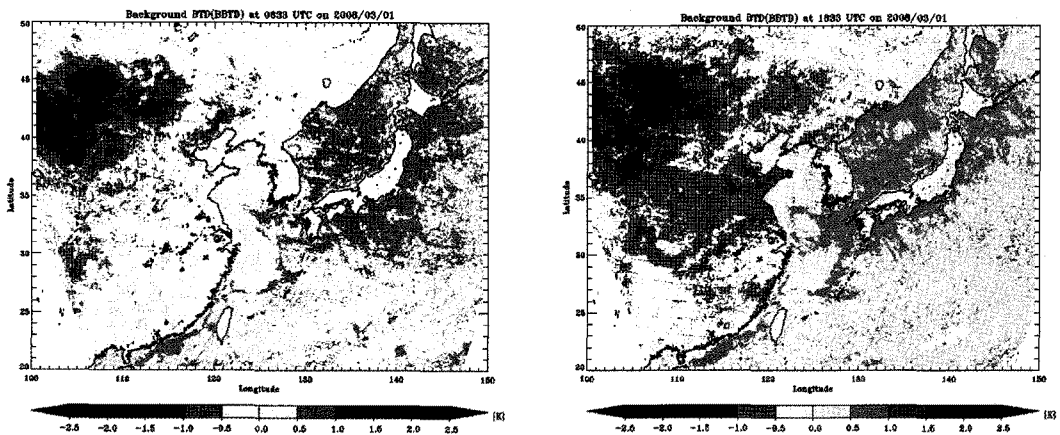


Fig. 2. Background Threshold Values (BTV) distribution at 0633 UTC on 1 March 2008 (left), on 2 March 2008 (right).

산출된 배경경계값 결과이며 중국 내륙지방은 배경경계값이 비교적 낮게, 해양 지역에서는 비교적 높게 산출되었다. 이는 배경경계값이 내륙지방은 지표면 온도와 방출율에 의해 낮은 값을, 해양에선 수증기에 의해 비교적 높은 값을 보인다는 하중성 등(2006)의 결과와 같다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 앞에서 설명한 개념을 바탕으로 만든 배경경계값 산출의 흐름도이다. 지표특성, 온도, 태양천정각 등에 의한 효과를 고려하기 위하여 배경경계값은 각 화

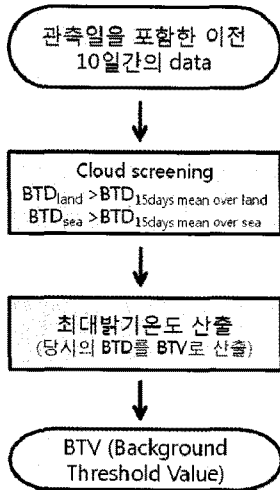


Fig. 3. Flow chart for Background Threshold Value retrieval algorithm.

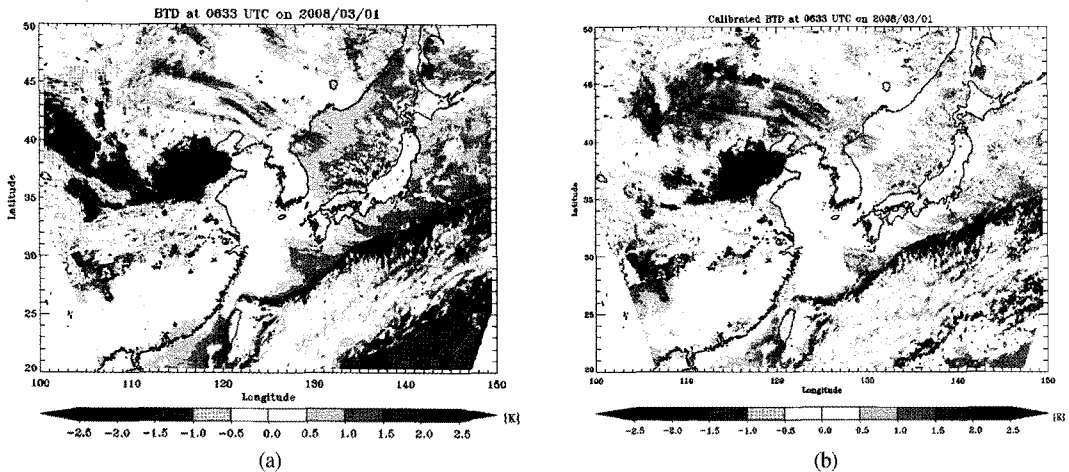


Fig. 4. (a) BTD distribution at 0633 UTC on 1 March 2008. (b) Derived aerosol index distribution based on (a) at same time.

소에서 시간대별로 산출되었다. 이 경계값을 BTD 값에서 보정해주면 기존의 BTD 방법이 가지는 오차 원인을 제거할 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5의 (a)는 각각 2008년 3월 1일 0633 UTC와 1833 UTC에 관측된 BTD 결과이며, (b)는 Fig. 4에서 보인 배경경계값을 보정해 준 황사지수 분포도이다. 첫째로, 낮 시간대(0633 UTC)인 Fig. 4의 BTD 분포도를 보면 중국 내륙에 황사 신호가 존재하는 것을 볼 수 있다. 그러나 보정된 황사지수 분포도에서는 이 신호가 사라진 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 2에서 보았듯이 이 지역에서 음수의 배경경계값이 산출되어 BTD값이 보정되었기 때문이다. 둘째, Fig. 1의 야간(1833 UTC)의 BTD 분포도를 보면 육지 대부분 지역에서 음의 BTD값을 보여 황사가 존재하는 것 같은 오류를 주었다. 그러나 황사지수에서는 이로 인한 오차가 제거된 것을 볼 수 있다. 이는 야간에 육지 대부분 지역에서 복사 냉각으로 지표 온도가 낮아지며 나타나는 효과가 배경경계값으로 보정되었기 때문이다. 마지막으로, 육지와 해양의 불연속성이 완화된 것을 볼 수 있다. 배경경계값은 지표 상태와 수증기량에 의해 육지에서는 음수로, 해양에서는 양수로 산출되었으며 이 값을 BTD값에 보정해 줌으로서 해양에서는 황사 시그널을 상대적으로 강화시키고, 육지에서는 상대적으로 약화시켰기 때문이다. 이로써 앞서 제기된 BTD 방법을 이용한 황사탐지방법의 세가지 문제점이 배경경계값을 적용함으로써 완화되었다.

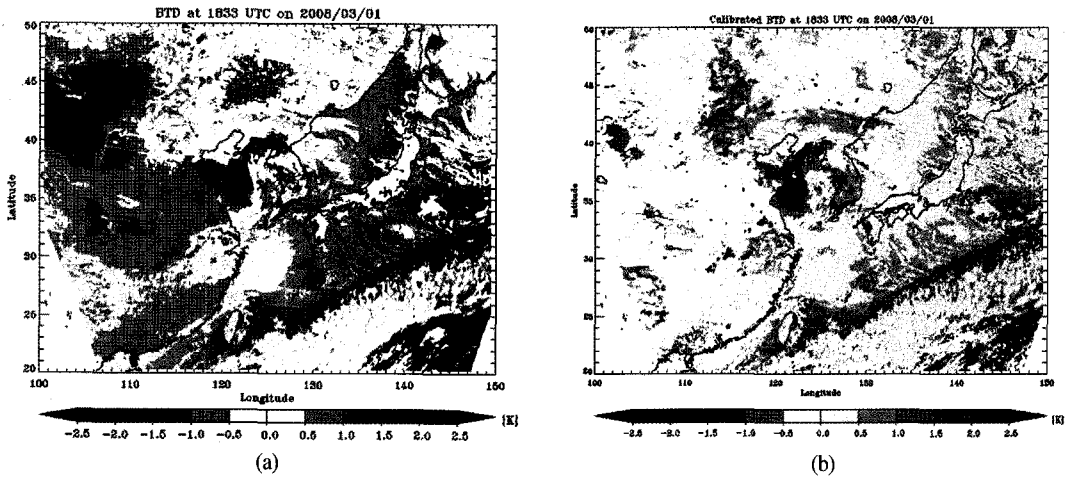


Fig. 5. (a) BTD distribution at 1833 UTC on 1 March 2008. (b) Derived aerosol index distribution based on (a) at the same time.

#### 4. 검증

OMI(Ozone Mapping Instrument) AI(Aerosol Index)는 자외선 파장을 이용하여 에어로솔을 탐지한다. 자외선은 지표면 반사도가 상대적으로 낮으며 광물성입자를 함유한 사막성애러솔이나 화재에 의한 에어로솔에 흡수되어 민감하게 반응한 반면 구름과 수증기에 큰 영향을 받지 않아 황사탐지에 적합하다(Torres *et al.*, 2007). 적도통과 시간이 정오시간대이며 공간분해능이 연직하방에서 23×13km로 매우 낮다. 본 연구에서 산출한 황사지수를 OMI AI지수와 검증을 위해 비교해보았다. Fig. 6 (a)는 2008년 3월 1일 0433 UTC의 황사지수 분포도이며 (b)는 0412 UTC 때 OMI에서 관

측한 한반도 부근 AI 분포도이다. 중국의 산동과 요동반도 사이에 뚜렷한 분포를 보여주고 있다. 이러한 분포는 본 연구에서 도출한 배경경계값 보정을 거친 황사지수와 매우 유사한 분포를 보여주고 있다. 반면 Fig 4에 기존의 BTD 방법으로 구한 황사분포도에서 높은 황사지수를 보여주었던 중국 북서부 내륙지방과 남부지방의 황사분포는 오염임을 OMI AI 분포도는 보여주고 있다.

#### 5. 결론

정지궤도 위성에 탑재된 적외선 파장대는 일반적인 에어로솔 입자보다 크기 때문에 소광계수가 작고 지표

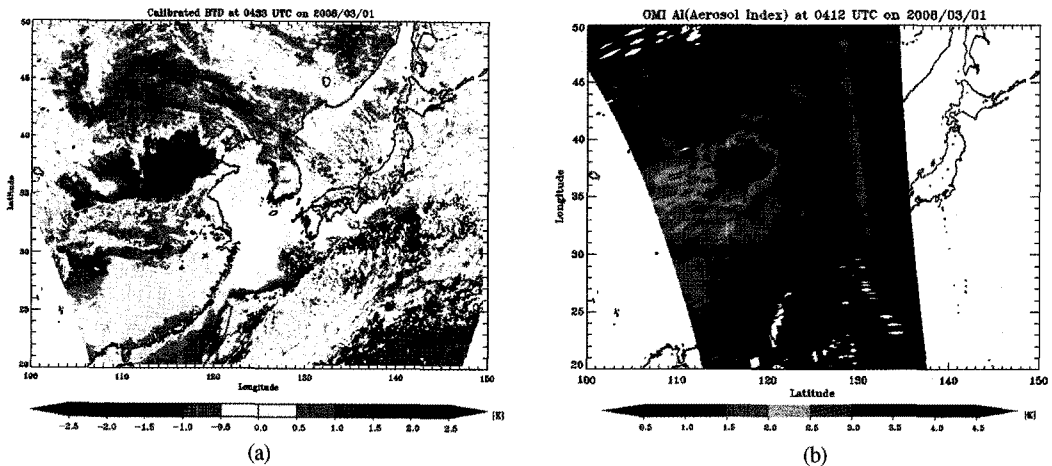


Fig. 6. (a) Aerosol Index distribution at 0433 UTC on 1 March, 2008. (b) OMI Aerosol Index distribution at 0412 UTC on same day.

특성, 온도, 수증기 등에 영향을 받기 때문에 에어러솔 탐지에 어려움이 있어왔다. 이러한 문제점으로 기존의 BTD 방법으로 구한 황사분포도는 황사발원지에 높은 값을 보여주었고 주야간 그리고 해양과 육지에 불연속적인 값을 보여주었다. 이러한 원인은 지표면특성, 온도, 수증기 등에 대한 영향을 제거해줄 수 없었기 때문이었다.

본 연구에서는 가시채널을 이용한 에어러솔 탐지에 이용되었던 배경경계값이란 개념을 적외선채널에 그 개념의 도입 가능성에 초점을 맞추어 연구하였다. 적외선 채널을 이용한 11과 12  $\mu\text{m}$ 의 밝기 온도차이를 이용한 BTD 방법이 가지는 문제점을 개선함으로써 이 파장대를 이용한 황사탐지의 가능성을 높였다. 특히 정지궤도 위성에서의 주야간 연속적인 관측은 자료의 연속적인 측면에서 실시간 검증이 가능하고 보다 정확한 황사 관측이 가능해져 황사 예보의 향상에 도움이 될 것이며 실시간 황사 조기경보 시스템의 구축이 가능해 질 것이다. 이 방법은 최근 궤도에 진입한 천리안 위성 같은 모든 정지궤도 위성에 적용될 수 있을 것이다.

## 사 사

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업 (RACS 2010-1011)과 BK21의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

임영옥, 정 용, 1989. 호흡성 분진 중의 중금속 오염도에 관한 조사 연구, 한국대기보존학회지, 5(1): 68-78.

하종성, 김재환, 이현진, 2006. 적외선 채널을 이용한 에어러솔 탐지의 경계값 및 민감도 분석, 대한원격탐사학회지, 22(6): 507-518.

Ackerman S. A. and K. I. Strabala, 1994. Satellite remote sensing of  $\text{H}_2\text{SO}_4$  aerosol using the 8 to 12- $\mu\text{m}$  window region: Application to Mount Pinatubo, *Journal of Geophysical*

*Research*, 99(D9): 18639-18649.

Berntsen T. K., S. Karlsdottir, and D. A. Jaffe, 1999. Influence of Asian emissions on the composition of air reaching the North Western United States, *Geophysical Research Letters*, 26(14): 2171-2174.

Chun Y., K. O. Boo, J. Kim, and S. U. Park, 2001. Synopsis, transport and physical characteristics of Asian dust in Korea, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16): 18461-18469.

Gu Y., W. I. Rose, and G. J. S. Bluth, 2003. Retrieval of mass and sizes of particles in sandstorms using two MODIS IR bands : A case study of April 7, 2001 sandstorm in China. *Geophysical Research Letters*, 30(15): 1805, doi : 10.1029/2003GL017405.

Hauser A., D. Oesch, and S. Wunderle, 2005. NOAA AVHRR derived Aerosol Optical Depth (AOD) over Land : A comparison with AERONET Data, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, D8204, doi : 10.1029/2004JD005439.

Huang J., J. Ge, and F. Weng, 2007. Detection of Asia dust storms using multisensor satellite measurement. *Remote Sensing of Environment*, 110(2007): 186-191.

Iino N., K. Kinoshita, A. C. Tupper, and T. Yano, 2004. Detection of Asian dust aerosols using meteorological satellite data and suspended particulate matter concentrations, *Atmospheric Environment*, 38(2004): 6999-7008.

Jaffe D., T. Anderson, D. Covert, R. Kotchenruther, B. Trost, J. Danielson, W. Simpson, T. Berntsen, S. Karsdottir, D. Blake, J. Harris, G. Carmichael, and I. Uno, 1999. Transport of Asian air pollution to North America, *Geophysical Research Letters*, 26(6): 711-714.

Kwon H. J., S. H. Cho, Y. S. Chun, F. Lagarde, and G. Pershagen, 2002. Effect of the Asian dust event on daily Mortality in Seoul, Korea,

- Environmental Research Section A* 90, 1-5 (2002).
- Liu C. and M. H. Smith, 1995. Urban and rural aerosol particle optical properties, *Atmospheric Environment*, 29(22): 3293-3301.
- McKendry I. G., J. P. Hacker, R. Stull, S. Sakiyama, D. Mignacca, and L. Reid, 2001. Long-range transport of Asian dust to the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), 18361-18370.
- Monn C. H., O. Braendli, G. Schaeppi, C. H. Schindler, U. Achermann-Liebrich, P. H. Leuenberger, and Sapaldia Team, 1997. Particulate matter < 10  $\mu\text{m}$ (PM10) and total suspended particulates (TSP) in urban, rural and alpine air Switzerland, *Atmospheric Environment*, 29(19): 2565-2573.
- Prata A. J., 1989. Observation of volcanic ash clouds in the 10-12 window using AVHRR/2 data, *International Journal of Remote Sensing*, 10: 751-671.
- Saxena V. K., S. Yu, and J. Anderson, 1997. Impact of Stratospheric volcanic aerosols on climate : evidence for aerosol short-wave and long-wave forcing in the southeast US, *Atmospheric Environment*, 31: 4211.
- Takemura T., I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi, and I. Sano, 2002. Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia, *Geophysical Research Letters*, 29(24): 2158, doi : 10.1029/2002GL016251
- Torres O., A. Tanskanen, B. Veihelmann, C. Ahn, R. Braak, P. K. Bhartia, P. Veefkind, and Pieternel Levelt, 2007. Aerosol and surface UV product from Ozone Monitoring Instrument observation: An overview, *Journal of Geophysical Research*, 112(D24S47): doi : 10.1029/2007JD008809
- Vickers R. S. and R. P. Lyon, 1967. Infrared sensing from spacecraft: A geological interpretation. *Thermophysics of spacecraft and Planetary Bodies: Radiation Properties of Solids and the Electromagnetic Radiation Environment in Space*, edited by G. B. Heller, Pages 585-607, Academic, San Diego, Calif
- Wen S. and W. I. Rose, 1994. Retrieval of size and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5. *Journal of Geophysical Research*, 99(D3): 5421-5431.
- Xiao H., G. R. Carmichael, and J. Durchenwald, 1997. Long-range transport of Sox and dust in East Asia during the PEM B experiment, *Journal of Geophysical Research*, 102(D23): 28589-28612.
- Yu T., W. I. Rose, and A. J. Prata, 2002. Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using "split window" IR data from GOES and AVHRR, *Journal of Geophysical Research*, 107(D16): 4311, doi : 10.1029/2001DJ000706.
- Zhao T. L., S. L. Gong, X. Y. Zhang, and D. A. Jaffe, 2007. Asian dust storm influence on North American ambient PM levels: observational evidence and controlling factors, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7: 9883-9686.