

열적외선대역자료로부터 지표면온도를 결정하기 위한 해석적풀이방법

량 철 호

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우주를 정복한 위성과학자들처럼 최첨단돌파전을 힘있게 벌려 나라의 전반적과학기술을 하루빨리 세계적수준에 올려세워야 합니다.》

지표면온도(LST)는 기후변화와 생태환경과 같은 연구분야에서 가장 중요한 파라메터들중의 하나로 될뿐아니라 지표면습기와 증발산량과 같은 기상학적파라메터들을 얻기 위한 기초로 된다. 특히 지표면온도는 재해성기상현상의 하나인 가물을 평가하는데서 중요한 인자로 리용되고있다.

이 논문에서는 다중스펙트럼대역에서 원격수감된 열적외선자료에 기초하여 LST를 회복하기 위한 해석적풀이방법에 대하여 서술하였다. 여기서는 선행리론에 기초하여 지표면온도와 평균대기온도사이의 차에 대한 항을 리용한 LST의 해석적풀이방법을 제기하였다.

1. 최소2제곱법에 의한 지표면온도회복방법

구하려는 파라메터가 LST이므로 전체 대기를 포함하는 다음의 복사수송방정식이 지표면으로부터 위성원격수감기까지의 복사전달을 모형화하는데 리용되였다.[1, 2]

$$B_i(T_b) = B_i(T_s)\varepsilon_i\tau_i + B_i(T_a)(1-\varepsilon_i)(1-\tau_i)\tau_i + B_i(T_a)(1-\tau_i) \quad (1)$$

여기서 $B_i(T_b)$ 는 원격수감기에 수감되는 대역 i 에서의 복사세기, T_b 는 밝기온도, T_s 는 지표면온도, T_a 는 평균대기온도이며 $B_i(T_s)$ 와 $B_i(T_a)$ 는 대역 i 에서 온도가 T_s 인 지표면과 평균대기온도 T_a 인 대기의 흑체복사세기이다. 또한 ε_i 는 대역 i 에서의 지표면방사율이며 τ_i 는 수증기함량과 밀접히 관계되는 대역 i 에서의 대기투과률이다. 대역이 $i=2$ 이라면 6개의 미지파라메터가 존재하는데 T_s , T_a , $\varepsilon_i(i=1,2)$ 와 $\tau_i(i=1,2)$ 가 된다.

식의 오른쪽에 있는 첫번째 항은 지표면복사이고 두번째 항은 지표면에 의해 반사되는 아래방향의 대기복사이며 세번째 항은 옷방향의 대기복사이다. 태양복사는 거의 영향을 주지 않기때문에 따로 취급하지 않는다.

우에서 소개된바와 같이 i 개의 열적외선대역에서의 정보를 포함하는 i 개의 방정식계에는 T_s , T_a 와 대역 i 에서의 지표면복사율 ε_i , 대기투과률 τ_i 를 비롯한 $2i+2$ 개의 미지파라메터들이 존재한다. 그러므로 방정식계는 열리게 되며 따라서 풀이를 얻을수 없게 된다.

이 문제를 해결하기 위하여 다음과 같은 최소2제곱법의 원리를 적용하였다. 초기추정량 ε_i, τ_i 로부터 출발하여 최종풀이 $T_s^*, T_a^*, \varepsilon_i^*, \tau_i^*$ (*은 대응하는 파라메터들의 풀이를 의미한다.)이 유도되는데 이것은 다음의 항들 즉 $|\varepsilon_i^* - \varepsilon_i|$, $|\tau_i^* - \tau_i|$, $|B_i(T_b^*) - B_i(T_b)|$ 혹은 다음과 같은 목적함수가 최소값을 가지도록 한다.

$$S = \sum_i \left\{ (\varepsilon_i^* - \varepsilon_i)^2 + (\tau_i^* - \tau_i)^2 + [B_i(T_b^*) - B_i(T_b)]^2 \right\} \quad (2)$$

여기서

$$B_i(T_b^*) = B_i(T_s^*)\varepsilon_i^*\tau_i^* + B_i(T_a^*)(1 - \varepsilon_i^*)(1 - \tau_i^*)\tau_i^* + B_i(T_a^*)(1 - \tau_i^*) \quad (3)$$

$S = S_{\min}$ 의 수치풀이는 반복 혹은 소거법으로 풀수 있지만 계산량이 방대하기때문에 합리적인 단순화과정을 통하여 근사적인 해석풀이가 얻어지게 하였다.

원격수감기에 수감된 복사값은 지표면과 대기사이의 호상작용에 대한 결과이므로 때때로 잘못 평가된 지표면온도와 대기온도는 목적함수가 최소값을 가지게 할수 있다. 다시 말하여 목적함수의 최소값을 취하여 얻어지는 풀이는 T_s^* 와 T_a^* 에서 큰 오차를 발생시킬수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 여기서는 인자 $T_\Delta = T_s^* - T_a^*$ 를 도입하였다. 지표면온도와 평균대기온도는 일정한 분포범위를 가지고있으며 회복의 목적파라미터가 지표면온도이기때문에 다음과 같은 선형화에 의하여 지표면온도중위수의 근사적인 값을 얻을수 있다.[3]

$$B_i(T) = B_i'(T_m)T + (B_i(T_m) - B_i'(T_m)T_m) \quad (4)$$

여기서

$$B_i'(T_m) = \frac{dB_i(T)}{dT} \Big|_{T=T_m} \quad (5)$$

식 (4)는 다음과 같이 간략화할수 있다. 즉

$$B_i(T) = k_i T + h_i \quad (6)$$

여기서 $k_i = B_i'(T_m)$, $h_i = B_i(T_m) - B_i'(T_m)T_m$ 이다.

MODIS자료에 대한 열적외선대역에 대한 단순화된 회귀식들은 표 1과 같다.[2]

표 1. MODIS자료에 대한 단순화된 회귀식들

대역	회귀식
20	$B_{20}(T) = (0.000638T_m - 0.170)T + 0.189T_m - 50.9$
22	$B_{22}(T) = (0.000821T_m - 0.218)T + 0.243T_m - 65.2$
23	$B_{23}(T) = (0.000910T_m - 0.241)T + 0.270T_m - 72.1$
29	$B_{29}(T) = (0.000215T_m - 0.465)T + 0.635T_m - 145.9$
31	$B_{31}(T) = (0.00116T_m - 0.206)T + 0.341T_m - 69.7$
32	$B_{32}(T) = (0.000868T_m - 0.139)T + 0.256T_m - 49.4$

식 (6)을 리용하여 $B_i(T_s^*) - B_i(T_a^*)$ 를 전개하고 그로부터 다음의 식들을 얻을수 있다.

$$B_i(T_s^*) - B_i(T_a^*) = (k_i T_s^* + h_i) - (k_i T_a^* + h_i) = k_i (T_s^* - T_a^*) = k_i T_\Delta \quad (7)$$

$$S = \sum_i \frac{[(k_i T_s^* + h_i)(1 - \tau_i^2 + \varepsilon_i \tau_i^2) - k_i T_\Delta (1 - \tau_i^2 + \varepsilon_i \tau_i^2 - \varepsilon_i \tau_i) - B_i(T_b)]^2}{[B_i(T_b)\tau_i^2 + k_i T_\Delta \tau_i (1 - \tau_i^2)]^2 + [B_i(T_b)(2\varepsilon_i \tau_i - 2\tau_i) + k_i T_\Delta \varepsilon_i (1 + \tau_i^2 - \varepsilon_i \tau_i^2)]^2 + (1 - \tau_i^2 + \varepsilon_i \tau_i^2)^2}$$

$$T_s^* = \sum_i \frac{k_i (1 - \tau_i^2 + \varepsilon_i \tau_i^2) [B_i(T_b) + k_i T_\Delta (1 - \tau_i^2 + \varepsilon_i \tau_i^2 - \varepsilon_i \tau_i) - h_i (1 - \tau_i^2 + \varepsilon_i \tau_i^2)]}{[k_i (1 - \tau_i^2 + \varepsilon_i \tau_i^2)]^2} \quad (8)$$

식 (8)은 원격수감기들에 관측된 밝음도값 $B_i(T_b)$, 수감기들이 받는 매 열적외선대역들에 관한 플랑크함수의 선형전개계수들, 투과률, 방사률, LST와 평균대기온도의 편차와 같은 입력파라미터들만 주어지면 LST가 직접 계산될수 있다는것을 보여준다.

론문에서 제기한 회복방법과정에서 가장 중요한 단계는 T_Δ 의 초기값을 정확히 결정하는것이다.

모의해석을 통한 결과를 분석하면 평균대기온도와 지표면온도가 서로 선형적인 관계를 가진다는것을 알수 있다. 각이한 계절의 평균대기온도와 지표면온도와의 관계를 표 2에 제시하였다.

표 2. 평균대기온도 T_a 와 지표면온도 T_0 사이의 관계

계절	관계식	R^2
봄	$T_a = T_0 - 8.333$	0.997
여름	$T_a = 0.98T_0 - 1.6$	0.995 4
가을	$T_a = 0.94T_0 + 9.8$	0.998 6
겨울	$T_a = 1.02T_0 - 14.5$	0.997 3

실천적인 응용에서는 최소2제곱법에서 요구되는 파라미터 T_Δ 를 기상관측자료를 리용하여 결정할수 있는데 각이한 T_Δ 인 경우의 계산결과를 분석해보면 $T_\Delta \approx 8K$ 라고 고정해도 오차가 그리 크지 않은 결과를 얻을수 있다.

2. 회복알고리즘의 정확성검증

최소2제곱법을 적용한 LST회복의 정확도를 평가하기 위하여 2016년 1월—12월까지의 MODIS관측자료를 리용하여 분할창문법과 론문에서 제기한 최소2제곱법으로 지표면온도를 회복하고 같은 시기의 지표면관측온도와 비교하였다.(표 3)

표 3. 분할창문법과 최소2제곱법의 비교결과

회복방법	절대오차/K	평균2제곱오차/K
분할창문법	0.945 2	1.256 8
최소2제곱법	0.410 9	0.536 3

표 3에서 보는바와 같이 최소2제곱법이 분할창문법보다 더 좋은 회복결과를 준다는것을 알수 있다.

맺는 말

론문에서 제기한 해석풀이방법은 다른 회복방법들보다 정확도가 비교적 높으며 응용에서 거의나 제한을 받지 않는다.

다시말하여 이 론문에서 제기한 방법은 각이한 위성들로부터의 자료와 각이한 시간에 대하여 모두 적용할수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 최길철 등; 기상위성에 의한 원격조사응용, 외국문도서출판사, 55~118, 주체103(2014).
- [2] C. Eduardo; Remote Sensing of Environment, 124, 321, 2012.
- [3] L. Peres; International Journal of Remote Sensing, 31, 4387, 2010.

주체 107(2018)년 4월 5일 원고접수

An Analytic Solution Method for Retrieving Land Surface Temperature from Thermal Infrared Data

Ryang Chol Ho

This paper describes land surface temperature(LST) retrieval method based on thermal infrared data remotely sensed in multiband. In search of quantitative remote sensing retrieval methods for the inversion model of the radiance transfer equation, a quantitative retrieval analytical solution method is proposed i.e. adding a constraint of the difference between the LST and the effective mean atmospheric temperature and deriving an analytical solution of the retrieved LST.

Key words: land surface temperature, thermal infrared remote sensing, retrieval