

MODIS 지표면 온도 자료와 지구통계기법을 이용한 지상 기온 추정

Estimation of Near Surface Air Temperature Using MODIS Land Surface Temperature Data and Geostatistics

신휴석* · 장은미** · 홍성욱***

HyuSeok Shin · Eunmi Chang · Sungwook Hong

요약 수문학, 기상학 및 기후학 등에서 필수적인 자료중의 하나인 지상기온 자료는 최근 보건, 생물, 환경 등의 다양한 분야로까지 활용영역이 확대되고 있어 그 중요성이 커지고 있으나 지상관측을 통한 지상기온자료의 취득은 시공간적인 제약이 크기 때문에 실측된 기온자료는 시공간 해상도가 낮아 높은 해상도가 요구되는 연구 분야에서는 활용성에 큰 제약을 갖게 된다. 이를 극복하기 위한 하나의 대안으로 상대적으로 높은 시공간 해상도를 가지고 있는 위성영상자료에서 얻을 수 있는 지표면온도 자료를 이용하여 지상기온을 추정하는 많은 연구들이 수행되어 왔다. 본 연구는 이러한 연구의 일환으로써 기상청에서 제공하고 있는 AWS(Automatic Weather Station)에서 취득된 2010년 지상 온도 자료(AWS data)를 바탕으로 대표적인 지표면 온도 자료인 MODIS Land Surface Temperature(LST data:MOD11A1)와 지상기온에 영향을 미칠 수 있는 Land Cover Data, DEM(digital elevation model) 등의 보조 자료와 함께 다양한 지구통계 기법들을 이용하여 남한 지역의 지상기온을 추정하였다. 추정 전 2010년 전체(365일) LST자료와 AWS자료와의 차이에 대한 RMSE(Root Mean Square Error)값의 계절별 피복별 분석 결과 계절에 따른 RMSE값의 변동계수는 0.86으로 나타났으나 피복에 따른 변동계수는 0.00746으로 나타나 계절별 차이가 피복별 차이보다 큰 것으로 분석되었다. 계절별 RMSE 값은 겨울철이 가장 낮은 것으로 나타났으며 AWS자료와 LST자료와 보조 자료를 이용한 선형 회귀분석결과에서도 겨울철의 결정 계수가 가장 높은 0.818로 나타났으며, 여름철의 경우에는 0.078로 나타나 계절별 차이가 매우 크게 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 지구통계 기법들의 대표적인 방법론인 크리깅 방법 중 일반적으로 많이 사용되고 있는 정규 크리깅, 일반 크리깅, 공동 크리깅, 회귀 크리깅을 이용하여 지상기온을 추정한 후 모델의 정확도를 판단할 수 있는 교차 검증을 실시한 결과 정규 크리깅과 일반 크리깅에 의한 RMSE 값은 1.71, 공동 크리깅과 회귀 크리깅에 의한 RMSE 값은 각각 1.848, 1.63으로 나타나 회귀 크리깅 방법에 의한 추정의 정확도가 가장 높은 것으로 분석되었다.

키워드 : 지표면 대기 온도, 자동기상측정망, 지표면 온도, 모디스 지표 온도, 지구통계학, 회귀 크리깅

Abstract Near surface air temperature data which are one of the essential factors in hydrology, meteorology and climatology, have drawn a substantial amount of attention from various academic domains and societies. Meteorological observations, however, have high spatio-temporal constraints with the limits in the number and distribution over the earth surface. To overcome such limits, many studies have sought to estimate the near surface air temperature from satellite image data at a regional or continental scale with simple regression methods. Alternatively, we applied various Kriging methods such as ordinary Kriging, universal Kriging, Cokriging, Regression Kriging in search of an optimal estimation method based on near surface air temperature data observed from automatic weather stations (AWS) in South Korea throughout 2010 (365 days) and MODIS land surface temperature (LST) data (MOD11A1, 365 images). Due to high spatial heterogeneity, auxiliary data have been also analyzed such as land cover, DEM (digital elevation model) to consider factors that can affect near surface air temperature. Prior to the main estimation, we calculated root mean square error (RMSE) of temperature differences from the 365-days LST and AWS data by season and landcover. The results show that the coefficient of variation (CV) of RMSE by season is 0.86, but the equivalent value of CV by landcover is 0.00746. Seasonal differences between LST and AWS data were greater than that those by landcover. Seasonal RMSE was the lowest in winter (3.72). The results from a linear regression analysis for examining the relationship among AWS, LST, and auxiliary data show that the coefficient of determination was the highest in winter (0.818) but the lowest in summer (0.078), thereby indicating a significant level of seasonal variation. Based on these results, we utilized a variety of Kriging techniques to estimate the surface temperature. The results of cross-validation in each Kriging model show that the measure of model accuracy was 1.71, 1.71, 1.848, and 1.630 for universal Kriging, ordinary Kriging, cokriging, and regression Kriging, respectively. The estimates from regression Kriging thus proved to be the most accurate among the Kriging methods compared.

Keywords : Near Surface Air Temperature, AWS (Automatic Weather Station), Land Surface Temperature (LST), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer land surface temperature (MODIS LST), MOD11A1, Geostatistics, Regression Kriging

† This research was funded by KMA in the name of Development of Technologies for Expanding Application Fields of Satellite Data in 2011

* HyuSeok Shon, Researcher Ziin consulting Inc., Visiting Researcher, Institute for Korean Regional Studies, Seoul National University. gisci.hyu@gmail.com

** Eunmi Chang, CEO, Ziin consulting Inc. emchang21@gmail.com (Corresponding author)

*** Sungwook Hong, Satellite Analysis Division, National Meteorological Satellite Center. sesttiya@korea.kr

1. 서 론

수문학, 기상학 및 기후학 등에서 필수적인 자료 중의 하나인 지상기온 자료는 최근에는 보건, 생물, 환경, 생태 등의 다양한 분야로까지 활용영역이 확대되고 있어 그 중요성이 커지고 있다. 그러나 지상관측을 통한 지상기온자료의 취득은 시공간적인 제약이 크기 때문에 실측된 기온자료는 시공간 해상도가 낮아 높은 해상도가 요구되는 연구 분야에서는 활용성에 큰 제약을 갖게 된다.

이를 극복하기 위한 하나의 대안으로 상대적으로 높은 시공간 해상도를 가지고 있는 위성영상자료에서 얻을 수 있는 지표면 온도(Land Surface Temperature: LST) 자료를 이용하여 지상기온을 추정하는 많은 연구들이 최근까지 지속적으로 수행되어 왔으나 ([4,6,7,15,21]), 아직까지 명확하고 단일한 추정방법은 정립되어 있지 않은 상태이다. Zaksek[20]는 최근까지 진행되어온 지표면 온도 자료를 이용한 기온 추정 연구들을 그 방법에 따라 간단한 통계적인 접근 방식, 고급 통계를 이용한 방식, 온도 식생 지수 TVX(temperature-vegetation index) 접근 방식, 에너지 균형 접근 방식 등의 세 가지 그룹으로 나누어 검토한 후 이러한 접근법들 모두 높은 공간적 해상도를 갖는 추정 결과는 제시하지 못하고 있다고 밝히고 있다. 이러한 접근법 중 최근까지 활발히 연구되고 있는 통계적 접근법은 선형 회귀에 기초하여 기온과 LST간의 높은 상관관계를 보여주며 추정결과를 내놓고 있어 많은 주목을 받고 있으나 각 연구에서 개발된 방법들은 해당 연구지역에 한정되어 사용될 수 있을 뿐 일반적으로 적용할 수 없다는 단점을 지닌다. 고급 통계를 이용한 연구 중 Florio, E. N. 등의 연구에서는 기온추정에 있어 회귀적인 접근 보다는 지구통계적 기법(크리깅 기법)을 이용한 접근이 추정오차를 줄일 수 있음을 밝히고 있으며[5], Park[18]의 연구에서도 거리 역비례 가중치법(Inverse Distance Weighting; IDW)에 의한 기온추

정보다 지구통계기법 중의 하나인 공동크리깅(cokriging)을 이용한 방법이 크게 향상된 결과를 나타낸다고 밝히고 있다.

본 연구는 이러한 연구 결과들을 바탕으로 Zaksek [20]이 분류한 고급 통계를 이용한 접근 방법을 선택하여 다양한 지구통계 기법들을 통해 남한 지역의 지상기온을 추정하여 남한지역의 공간적 특성을 잘 반영하는 최적의 추정 방법론을 찾고자 하였다.

2. 연구자료

본 연구에서는 기상청에서 제공하고 있는 AWS (Automatic Weather Station)에서 취득된 2010년 지상 온도 자료(AWS 자료)를 바탕으로 대표적인 지표면 온도 자료인 MODIS land surface temperature(LST; MOD11A1) 자료와 지상기온에 영향을 미칠 수 있는 land cover, DEM (digital elevation model) 등의 보조 자료를 이용하여 남한 지역의 지상기온을 추정하였다. 본 연구에서 사용한 AWS 자료는 총 710개 지점 (Figure 1)에서 2010년 1년 동안의 1시간 단위로 측정된 기온자료(Table 1)를 이용하였다.

MOD11A1 자료는 HDF4(Hierarchical Data Format)

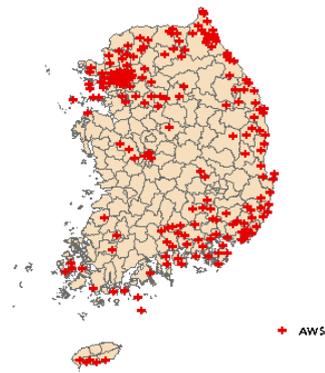


Figure 1. Locations of AWS (automatic weather station)

Table 1. AWS Data Format

TM	TA 01	TA 02	TA 03	TA 04	TA 05	TA 06	TA 07	TA 08	TA 09	TA 10	TA 11	TA 12	TA 13	TA 14	TA 15	TA 16	TA 17	TA 18	TA 19	TA 20	TA 21	TA 22	TA 23	TA 24
20100101	-7.5	-8.2	-7.6	-7	-7.3	-7	-6.7	-6.4	-4.8	-3.6	-1.8	-1.4	-0.8	-0.3	-0.5	-0.7	-1.3	-1.6	-1.4	-1.4	-2.1	-2.6	-1.7	0.3
20100102	-0.3	-0.9	-1.5	-2.5	-1.8	-1.4	-0.6	-0.3	-0.9	-0.4	0.4	1	1.8	3.5	2.6	2.5	1.3	-0.5	0.5	0.6	-0.1	-1	-1.4	-2.2
20100103	-1.7	-2.6	-3.1	-3.8	-4.2	-5.4	-5.5	-6	-4.5	-2.8	-1.1	-0.2	0.4	0.6	0.5	-0.7	-1.8	-2.9	-3.5	-4.3	-4.1	-4	-3.6	-3
20100104	-2.7	-2.5	-2.8	-3.2	-4.7	-5.4	-4.9	-4.3	-2.5	-3.4	-3.2	-2.7	-2.9	-2.7	-2.7	-2.3	-1.6	-0.5	-1.3	-1.4	0.1	-1.6	-1.8	-1.9
20100105	-1.8	-1.9	-2.9	-4.6	-4.6	-4.9	-5.8	-7.2	-6	-3.5	-1.7	-0.4	-2	-2.7	-1.9	-2.7	-5.3	-6.4	-6.1	-6.1	-6.8	-6.5	-7.5	-7.3

Table 2. The Scientific Data Sets(SDS) in the MOD11A1 Product

Dataset ID	SDS name	NumberType	Unit	Valid Range	Fill Value	scale Factor	add offset
subdataset 0	LST_Day_1km	UINT16	Kelvin	7500-65535	0	0.02	0.0
subdataset 1	QC_Day	UINT8	none	255	0	NA	NA
subdataset 2	Day_view_time	UINT8	hrs	0-240	0	0.1	0
subdataset 3	Day_view_angle	UINT8	DEG	V3 : 0-180 V4 : 0-130	0255	0.51.0	0 -65.0
subdataset 4	LST_Night_1km	UINT16	Kelvin	7500-65535	0	0.02	0.0
subdataset 5	QC_Night	UINT8	none	255	0	NA	NA
subdataset 6	Night_view_time	UINT8	hrs	0-240	0	0.1	0
subdataset 7	Night_view_angle	UINT8	DEG	V3 : 0-180 V4 : 0-130	0255	0.51.0	0 -65.0
subdataset 8	Emis_31	UINT8	none	255	0	0.002	0.49
subdataset 9	Emis_32	UINT8	none	255	0	0.002	0.49
subdataset 10	Clear_day_cov	UINT16	none	65535	0	* 0.0001	0.
subdataset 11	Clear_night_cov	UINT16	none	65535	0	* 0.0001	0.

형식으로 제공되고 있으며 1km 공간 해상도의 1200 행×1200열의 그리드 형태를 갖으며 정확한 격자 크기는 926.6254331m 이다. 제공되는 하위 데이터들은 LST_Day_1km, QC_Day, Day_view_time, Day_view_angle, LST_Night_1km, QC_Night, Night_view_time, Night_view_angle, Emis_31, Emis_32, Clear_day_cov 등이 있으며 (Table 2) 좌표계는 시누소이드 도법(sinusoidal projection)이 적용되어 있다. 본 연구에서는 2010년 1년동안의 MOD11A1 자료 중 낮 시간대의 LST 자료(LST_Day_1km)와 촬영시간(Day_view_time) 자료를 이용하여 AWS 자료와 시공간적으로 일치하는 LST 값을 추출하여 연구 자료로 사용하였다. 추정의 정확도를 높이기 위하여 기온에 영향을 미칠 수 있는 보조 자료로 지표면과 대기사이의 열 교환에 큰 영향을 미치는 토지피복 자료 (환경부 2010년 대분류 자료)와 30m 해상도를 갖는 DEM 자료를 이용하였다.

3. 연구방법

전통적인 통계기법들은 공간자료가 가지고 있는 공간적 특성으로 인하여 공간자료에 대한 상관관계 분석이나 미지값에 대한 예측에 한계를 갖는다[3]. 이에 반해 지구통계학(geostatistics)은 공간자료에 내포되어 있는 특성인 공간적 자기상관성(spatial autocorrelation)을 다룰 수 있는 방법을 제공하여[1] 시공간적으로 분포하는 자연현상과 관련된 자료를 분석할 수 있는 여러 기법들을 제공한다[11].

지구통계기법 중 가장 대표적인 크리깅(kriging) 기법은 공간적 상관관계의 특성을 파악할 수 있는 배리오그램(variogram) 모델링을 통해 실제 측정된 값들의 가중평균을 통해 예측지점의 값을 구한다[13,14,17]. 구체적으로 미조사지점 s_0 에서의 예측값($\hat{z}(s_0)$)은 실제 측정 데이터(표본점) $z(s_1), z(s_2), \dots, z(s_n)$ 과 각각의 좌표 값으로부터 산출된다(식 (1)).

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(s_i) \quad (1)$$

식 (1)에서 가중치 λ_i 는 예측오차 분산이 최소가 되는 값으로 구해지며 예측오차 분산은 변수들의 공간적 자기상관 구조에 따라 변화한다. 변수들의 공간적 자기상관 구조는 배리오그램 모델링을 통해 파악된다.

크리깅 기법은 다양한 종류가 있으며 이중 단순 크리깅 (Simple Kriging, SK)은 추정오차를 최소로 하는 가중치를 구하여 주위의 관측된 값들의 선형조합으로 미지값을 예측하는 기법이다[9]. 하지만 단순 크리깅은 추정식이 편향(bias)되어 있어 추정식의 평균과 모집단의 평균이 불일치되는 문제점이 존재하여 이를 해결하기 위해 크리깅 추정식이 편향되지 않으면서 오차분산을 최소로 하는 크리깅을 정규 크리깅(Ordinary Kriging, OK)이라 한다[9]. 이때 추정식이 편향되지 않기 위해서는 가중치의 합이 1이 되어야 하며[19], 예측 오차의 평균은 0이(식 (2)) 되어야한다[2]. 이 경우 가중치 λ_i 는 예측오차 분산이 최소화되는 값으로

정해지며 변수들의 공간적 자기상관 구조에 의존한다.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 0, E[\hat{Z}(s_0) - Z(s_0)] = 0 \quad (2)$$

관측된 값들의 선형조합으로 미지값을 예측할 경우 추정 정확성을 높이기 위하여 2가지 이상의 변수의 선형 조합을 통해 추정하는 크리깅 기법을 공동 크리깅(cokriging)이라 하며, 이 때 보조적으로 사용되는 이차 변수(secondary variable)들은 예측할 변수와 공간적인 상관관계가 존재해야 하며 이러한 관계는 예측의 정확성을 향상시킬 수 있다는 가정이 존재한다[2].

단순 크리깅, 정규 크리깅, 공동 크리깅 등의 크리깅 기법은 모두 자료가 공간적으로 정상성(stationarity)을 만족해야한다는 가정 하에 사용되는 기법들이다. 그러나 실제 공간 자료의 대부분은 일정한 경향을 나타내거나 위치가 변함에 따라 자료의 평균이 다르게 된다. 자료에 이러한 경향성이 존재하면 크리깅 기법을 사용함에 있어 필수적인 공간적 의존성에 관련한 설정오류(mis-specification)가 발생하여 추정치가 편향될 수 있다[12,16]. 따라서 크리깅을 수행하기 전에 경향성을 제거하여 자료가 가지고 있는 공간적인 특성을 반영하는 추정치를 구해야 한다. 즉, 자료의 경향성을 구하고 각 표본점들에서의 잔차를 사용하여 단순 크리깅 기법을 통해 미조사 지점의 잔차값을 추정하고 파악된 경향성과의 합을 통해 최종적인 예측값을 구할 수 있다. 자료가 갖는 경향을 $\mu(s)$, 잔차값을 $e(s)$ 라 하면 미조사지점의 예측값 $Z(s)$ 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z(s) = \mu(s) + e(s) \quad (3)$$

이 때 자료가 갖는 경향 $\mu(s)$ 를 회귀 기법을 이용하여 설명하고 설명되지 않은 변이인 잔차값 $e(s)$ 을 기대 값이 0인 단순 크리깅 (Simple Kriging)을 이용하여 구하여 최종적인 예측 값을 구하는 방법을 회귀 크리깅 (Regression Kriging)이라한다 [10], Figure 2 참고). 회귀 크리깅은 특정한 경향을 갖는 평균을 제거하지 않고 크리깅 가중치를 구하는 일반 크리깅 (Universal Kriging) 기법[3]이며 외부 추이를 이용하는 크리깅 (Kriging with External Drift, KED)기법과 보간 방법론 측면에서는 수학적으로 동일하다 할 수 있으며[9]. 경향성 모델링 시 다른 외부변수를 활용하는 KED보다 안정적이며 전통적인 회귀 방법론을 이용하여 외부 경향성을 모델링하기 때문에 다른 외부변수들을 이용

한 기존의 다양한 회귀 접근법을 사용할 수 있다는 장점을 갖는다고 볼 수 있다[10,16].

순수한 회귀 모형만을 사용할 것인지 순수한 크리깅 기법만을 사용할 것인지, 아니면 둘을 결합한 방법

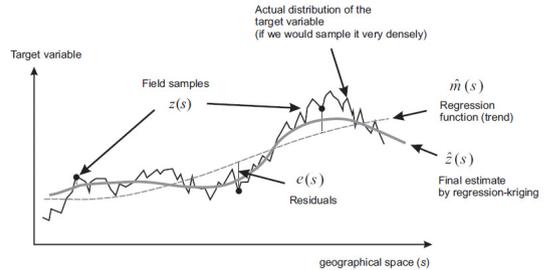


Figure 2. Schematic illustrating the Concept of Regression Kriging (Hengl[8], p.27).

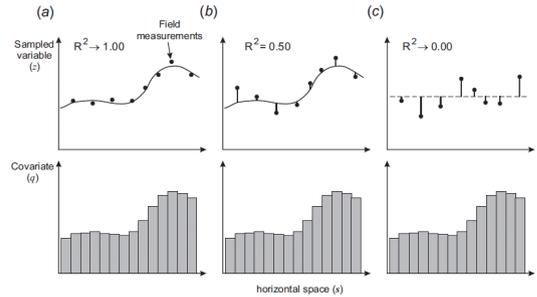


Figure 3. The Relationship between Kriging and R-Square (Hengl[8] p.29).

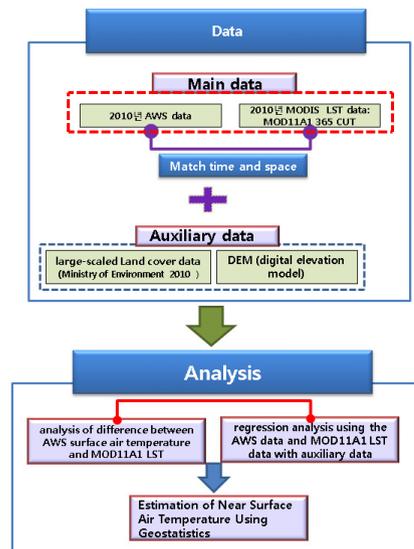


Figure 4. flow chart of the research process.

을 이용할지는 기본적으로 결정 계수(R-square)에 의해 선택될 수 있다(Figure 3). Figure 3의 (a)와 같은 경우에는 결정 계수가 1에 가까워 예측 오차(잔차)가 매우 작아지므로 순수한 회귀모형을 사용하는 것이 우선적인 방법이며 (c)의 경우에는 결정계수가 거의 0에 가깝기 때문에 크리깅 기법을 사용하는 것이 우선시 된다. (b)와 같은 상황에서는 회귀 모형과

크리깅의 결합을 사용하는 일반적인 사례라 할 수 있으며 본 연구의 맥락과 일치한다고 할 수 있다. 순수 크리깅과 순수 회귀는 특별한 경우의 공간 예측에서만 고려될 수 있을 것이다[8].

이상의 연구자료와 연구 방법을 통한 본연구의 주요 절차는 Figure 4와 같이 나타낼 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 AWS 지상 온도 자료와 MOD11A1 LST 자료간의 차이 분석

먼저 AWS 지상 온도 자료와 MOD11A1 LST 자료와의 차이에 대한 RMSE를 계절별 피복별로 계산하여 두 자료 간의 차이에 대한 시공간적인 변이 특성을 살펴보았다. 분석결과 두 자료의 차이에 대한 시간적 변이(계절별 RMSE)가 공간적 변이(피복별 RMSE)보다 큰 것으로 나타났다. 각 피복별 RMSE에 대한 변동 계수가 0.0746으로 나타났으나 계절별 RMSE에 대한 변동계수는 0.12652로 상대적으로 크게 나타나 계절 변화에 따른 변동이 큰 것으로 분석되었다.

계절별 RMSE는 겨울철이 가장 낮은 3.7로 나타났으며 여름철이 8.2로 가장 크게 나타났다. 상대적으로 대기습도가 높은 여름철보다 습도가 낮은 계절인 봄과 가을 그리고 겨울철에서의 RMSE값이 낮게 나타났다(Figure 5). 이는 대기 내 수증기가 지표와 대기사이의 열 교환 과정에서 중요한 역할을 한다는 사실을 고려한다면 어느 정도 설명이 될 수 있다고 판단된다. 피복에 따른 RMSE값에서는 각 피복 간의 차이는 크게 나타나지 않았으나 나지와 시가화 건조지역에서 수치가 크게 나타났으며 상대적으로 산림 지역과 초지 습지 지역에서 작은 값을 나타냈다(Figure 6). 이러한 결과는 도심지역의 기온과 관련된 연구를 수행함에 있어서 위성에서 취득된 LST 자료를 이용할 경우 다소 유의하여 연구를 수행해야 한다는 시사점을 제공한다고 볼 수 있으며 산림지역이나 초지에 대한 연구를 수행할 경우에는 LST자료가 상당히 유용하게 사용될 수 있음을 시사한다고 할 수 있다.

4.2 AWS 지상 온도 자료와 MOD11A1 LST 자료 및 보조자료를 이용한 회귀 분석

AWS 지상 온도 자료와 MOD11A1 LST 자료, 또한 지상기온에 영향을 미칠 수 있는 DEM 자료 및 토지 피복 자료 등의 보조 자료를 이용하여 회귀 모델링을 수행하여 LST 자료와 보조 자료가 얼마만큼의 지상기온에 대한 설명력을 갖는지 분석하였으며

이를 이용하여 지상기온 자료에 대한 경향성을 파악하고자 하였다. 2010년 1년간의 지상 온도 자료와

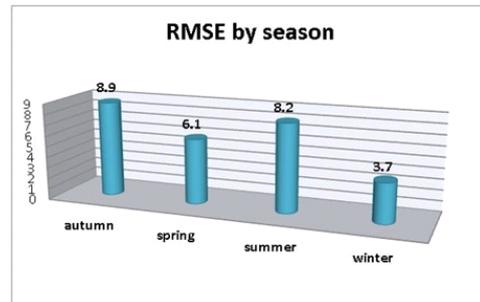


Figure 5. RMSE by Season.

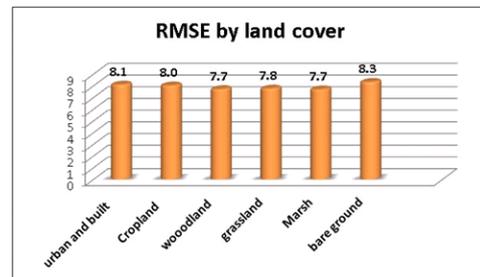


Figure 6. RMSE by Land Cover.

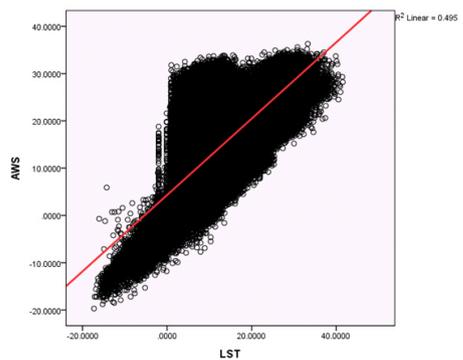


Figure 7. Scatter Plot between AWS (y-axis) and LST(x-axis) Variables with Regression Line.

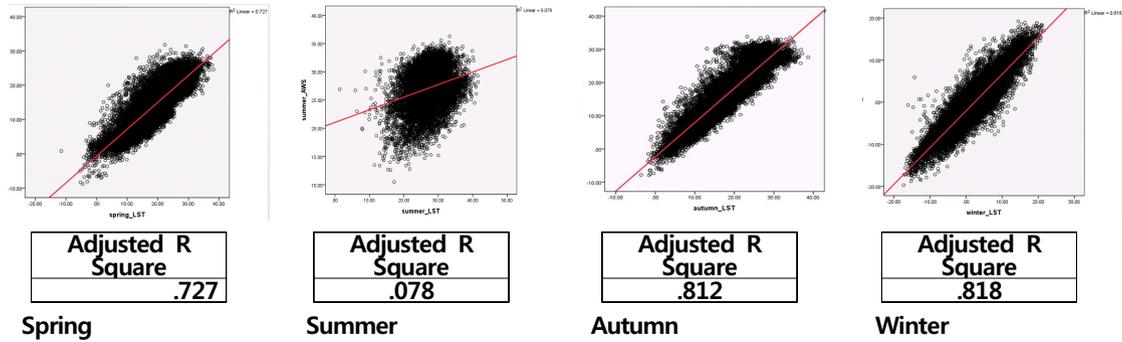


Figure 8. Scatter Plot by Season between AWS (y-axis) and LST (x-axis) variables with Regression Line and Adjusted R Square Values.

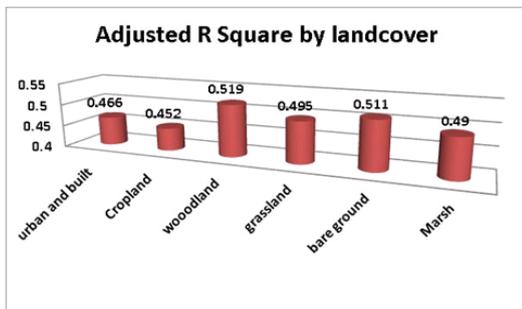


Figure 9. Adjusted R Square by Landcover.

MOD11A1 LST 자료 전체에 대한 두 변수 간 수정 결정 계수는 0.495로 나타나 상당히 높은 상관관계를 보여 주었으며 이는 Figure 7에 잘 나타나 있다. 설명변수로 DEM 자료를 추가하여 분석한 결과 수정 결정 계수가 0.481로 오히려 낮아졌으며 회귀계수 값 자체도 -0.001 에 지나지 않아 DEM 자료의 설명력은 매우 낮게 나타났다. 전체 자료를 계절별 피복별로 분리하여 회귀 분석을 수행한 결과에서는 AWS 지상 온도 자료와 MOD11A1 LST 자료간의 차이 분석결과와 유사하게 계절별 결정계수의 차이가 피복별 차이보다 크게 나타났다. 계절별 수정 결정 계수는 여름철의 경우 0.812 0.818로 매우 높은 값으로 나타났다(Figure 8). 피복별 수정 결정계수는 산림 지역이 0.519로 가장 높은 값을 나타내었고 시가지 지역과 농지 지역이 각각 0.466 0.452로 다소 낮게 나타났으나 각 피복별 차이는 가장 큰 차이가 0.067에 지나지 않았다(Figure 9).

4.3 크리깅 기법을 이용한 지상 기온의 추정

AWS 지상 온도 자료와 MOD11A1 LST 자료간의

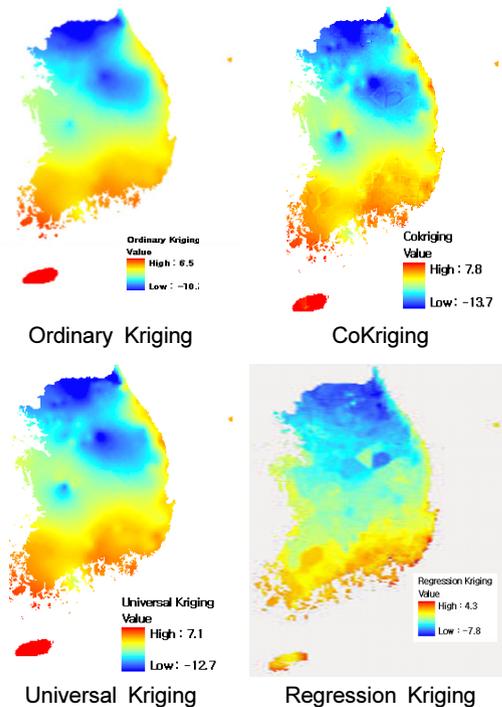


Figure 10. Results Maps of Air Temperature Estimation Using Various kriging Methods.

차이 분석 결과와 회귀분석 결과를 바탕으로 지구통계 기법들의 대표적인 방법론인 크리깅방법들 중 일반적으로 많이 사용되고 있는 정규 크리깅, 일반 크리깅, 공동 크리깅, 회귀 크리깅을 이용하여 지상기온을 추정한 후 추정결과에 대하여 교차검증을 실시하여 각 기법들 간의 추정의 타당성을 비교하였다.

추정 자료는 겨울철이 지상기온과 LST자료간의 상관성이 가장 높다는 선행분석결과를 이용하여 겨울철(12월, 1월, 2월) 평균기온과 가장 가까운 일자(12월

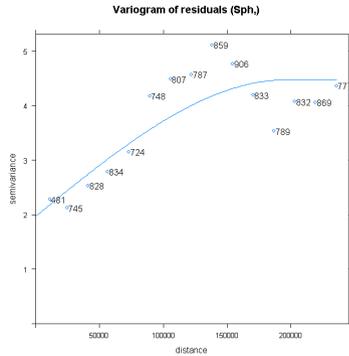


Figure 11. Variogram of Regression Residuals.

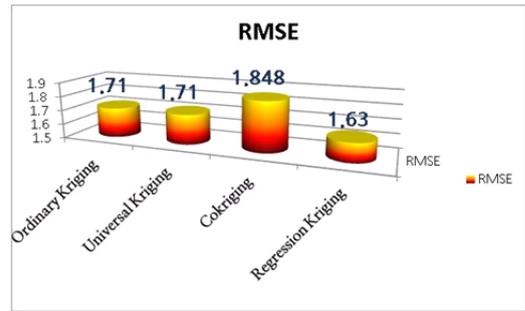
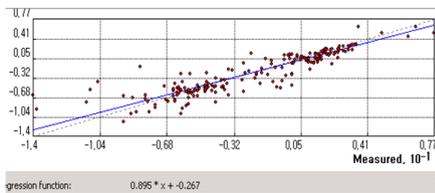
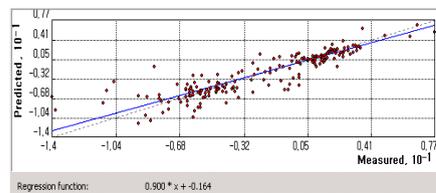


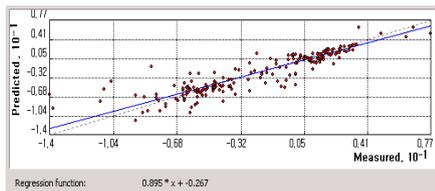
Figure 12. RMSE values by Cross Validation.



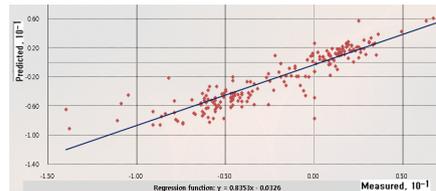
Ordinary Kriging



CoKriging



Universal Kriging



Regression Kriging

Figure 13. Scatter plot by Season Between Predicted Values and Measured Values with Regression Line and Adjusted R Square Value.

29일)의 AWS 자료와 MODIS LST자료를 이용하였다. Figure 10은 각 크리깅 기법들을 이용하여 지상기온을 추정한 결과를 지도화한 것이며 Figure 11은 회귀 크리깅 기법에 사용된 회귀 잔차의 공간적 자기상관 구조를 나타낸 배리오그램 모델링 결과를 나타낸 것으로 문턱값(sill)이 4.452, 상관거리(range)가 198526인 구형모델이 이용되었다. 모든 기법들에 대한 교차검증 결과는 Figure 12와 Figure 13에 나타나 있다. 교차검증은 leave-one-out cross-validation (LOOCV) 방법을 이용하여 RMSE 값을 산출하였다. 교차검증 결과 RMSE 값의 기법들 간의 차이는 크지 않았으나 회귀식을 이용하여 기온자료의 공간적인 경향성을 모델링하고 잔차값을 동시에 추정하여, 이 값들을 이용하여 최종적으로 추정 결과를 산출하는 회귀 크리깅 방법에 의한 추정 결과의 RMSE 값 (1.63)이 가장 낮

은 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 기상청에서 제공하고 있는 AWS(Automatic Weather Station)에서 취득된 2010년 지상 온도 자료(AWS data)를 바탕으로 지상 기온 관측 자료의 시공간적인 한계점을 극복할 수 있는 대표적인 위성자료인 MODIS 지표면 온도 자료(MODIS land surface temperature (LST data: MOD11A1)와 지상기온에 영향을 미칠 수 있는 토지 피복, DEM 등의 보조 자료를 이용하여 다양한 지구통계 기법들을 통해 남한 지역의 지상기온을 추정하였다. 추정전 2010년 전체(365일) LST data와 AWS data와의 차이에 대한 RMSE 값의 계절별 피복별 분석결과 두 자료의 차이에 대한

시간적변이(계절별 RMSE;변동계수: 0.12652)가 공간적변이(피복별RMSE;변동계수:0.0746)보다 큰 것으로 나타났다. 계절별 RMSE는 겨울철이 가장 낮은 3.7로 나타났으며 여름철이 8.2로 가장 크게 나타났다. 상대적으로 대기습도가 높은 여름철 보다 습도가 낮은 계절인 봄과 가을 그리고 겨울철에서의 RMSE값이 낮게 나타났다. 피복에 따른 RMSE값에서는 각 피복간의 차이는 크게 나타나지 않았으나 나지와 시가화 건조지역에서 수치가 크게 나타났으며 상대적으로 산림 지역과 초지 습지 지역에서 작은 값을 나타냈다. 이러한 결과는 최근 활발히 연구되고 있는 열섬 현상 연구와 같은 도심지역의 기온과 관련된 연구를 수행함에 있어서 위성에서 취득된 LST 자료를 이용할 경우 다소 유의하여 연구를 수행해야 한다는 시사점을 제공한다고 볼 수 있으며 반대로 산림지역이나 초지에 대한 연구를 수행할 경우에는 LST자료가 상당히 유용하게 사용될 수 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

AWS 지상 온도 자료와 MOD11A1 LST 자료 및 보조자료를 이용한 회귀 분석 결과 2010년 1년간의 지상 온도 자료와 MOD11A1 LST 자료 전체에 대한 두 변수 간 수정 결정 계수는 0.495으로 나타나 비교적 높은 연관성을 보였다. 설명변수로 DEM 자료를 추가하여 분석한 결과 DEM 자료의 설명력은 매우 낮게 나타났다. 2010년 전체 자료를 계절별 피복별로 분리하여 회귀 분석을 수행한 결과에서는 AWS 지상 온도 자료와 MOD11A1 LST 자료간의 차이 분석 결과와 유사하게 계절별 결정 계수의 차이가 피복별 차이보다 크게 나타났다. 계절별 수정 결정 계수는 여름철의 경우 0.078에 지나지 않았으나 가을철과 겨울철은 각각 0.812, 0.818로 매우 높은 값으로 나타났으며 피복별 결정 계수는 산림 지역이 0.519로 가장 높은 값을 나타내었고 시가화 지역과 농지 지역이 각각 0.466, 0.452로 다소 낮게 나타났으나 각 피복별 차이는 가장 큰 차이가 0.067에 지나지 않았다.

LST data와 AWS data와의 차이에 대한 RMSE 값의 계절별 피복별 분석 결과와 회귀 분석 결과 모두 상대적으로 대기습도가 높은 여름철과 습도가 낮은 계절인 봄과 가을 그리고 겨울철에서의 분석값 (RMSE 및 결정 계수)의 차이가 큰 것으로 나타났다. 이는 대기 내 수증기가 지표와 대기사이의 열 교환 과정에서 중요한 역할을 한다는 사실을 고려한다면 대기 중 습도가 지표면온도와 지상 기온간의 상관관계에 많은 영향을 미칠 수 있음을 시사하나, 본 연구에서는 실제 일별 습도자료를 이용하지 못했기 때문에 이 부분에 있어서 연구의 한계를 갖는다고 판단되며 이는 향후

연구에서 보완 되어야할 것이다.

이러한 결과를 바탕으로 지구통계 기법들의 대표적인 방법론인 크리깅방법들 중 일반적으로 많이 사용되고 있는 정규 크리깅, 일반 크리깅, 공동 크리깅, 회귀 크리깅을 이용하여 지상기온을 추정된 후 모델의 정확도를 판단할 수 있는 교차 검증을 실시한 결과 RMSE 값의 기법들 간의 차이는 크지 않았으나 회귀식을 이용하여 기온자료의 공간적인 경향성을 모델링하고 잔차값을 동시에 추정하여, 이 값들을 이용하여 최종적으로 추정 결과를 산출하는 회귀 크리깅 방법에 의한 추정 결과의 RMSE 값 (1.63)이 가장 낮은 것으로 분석 되었다.

References

- [1] Bohling, G. 2005, Introduction to geostatistics and variogram analysis, Kansas Geological Survey.
- [2] Chang, Kang-tsung, 2006, Introduction to Geographic Information Systems, New York: McGraw-Hill.
- [3] Choe, J. G. 2007, Geostatistics, SigmaPress.
- [4] Colombi, A; De Michele, C; Pepe, M; Rampini, A. 2007, Estimation of daily mean air temperature from MODIS LST in Alpine areas, EARSeL eProceedings, 6(1): 38-46.
- [5] Florio, E. N; Lele, S. R; Chi Chang, Y; Sterner, R; Glass, G. E. 2004, Integrating AVHRR satellite data and NOAA ground observations to predict surface air temperature: a statistical approach. International Journal of Remote Sensing, 25(15): 2979-2994.
- [6] Fu, G; Shen, Z; Zhang, X; Shi, P; Zhang, Y; Wu, J. 2011, Estimating air temperature of an alpine meadow on the Northern Tibetan Plateau using MODIS land surface temperature. Acta Ecologica Sinica, 31(1): 8-13.
- [7] Green, R. M; Hay, S. I. 2002, The potential of Pathfinder AVHRR data for providing surrogate climatic variables across Africa and Europe for epidemiological applications, Remote sensing of Environment, 79(2):166-175.
- [8] Hengl, T. 2009, A practical guide to geostatistical mapping, 2nd Edt., University of Amsterdam, Amsterdam, www.lulu.com.
- [9] Hengl, T; Heuvelink G.; Rossiter, D. 2007, About regression-kriging: From equations to case studies,

- Computers & Geosciences 33:1301-1315.
- [10] Hengl, T; Heuvelink, G; Stein, A. 2004, A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression kriging, *Geoderma* 122(1-2): 75-93.
- [11] Isaaks, E.H; Srivastava, R. M; 1989, *An Introduction to Applied Geostatistics*, Oxford Univ. Press, Bedford, Massachusetts.
- [12] Karl, J. W. 2010, Spatial predictions of cover attributes of rangeland ecosystems using regression kriging and remote sensing, *Rangeland Ecology & Management*, 63(3):335-349.
- [13] Kim, S. N; Lee, W. K; Kim, J. G; Shin, K. I;Kwon, T. H; Hyun, S. H; Yang, J.E. 2012, Prediction of Spatial Distribution Trends of Heavy Metals in Abandoned Gangwon Mine Site by Geostatistical Technique, *Journal of Korea Spatial Information Society* 20(4):17-27(in Korean with English abstract).
- [14] Matheron, G. 1973, The intrinsic random functions and their applications, *Advances in applied probability*, 439-468.
- [15] Neteler, M. 2010, Estimating daily Land Surface Temperatures in mountainous environments by reconstructed MODIS LST data, *Remote sensing*, 2(1): 333-351. Oxford University Press.
- [16] Park, H. J; Shin, H. S; Noh, Y. H; Kim, K. M; Park, K. H. 2012, Estimating Forest Carbon Stocks in Danyang Using Kriging Methods for Aboveground Biomass, *The Korean Association of Geographic Information Studies*, 15(1):16-33 (in Korean with English abstract).
- [17] Park, N.W. 2011, Integration of Categorical Data using Multivariate Kriging for Spatial Interpolation of Ground Survey Data, *Journal of Korea Spatial Information Society* 19(4):81-89(in Korean with English abstract).
- [18] Park, S. Y. 2009, Estimating Air Temperature over Mountainous Terrain by Combining Hyper temporal Satellite LST Data and Multivariate Geostatistical Methods, *Journal of the Korean Geographical Society*, 44(2):105-121 (in Korean with English abstract).
- [19] Webster, R; Oliver, M. 2001, *Geostatistics for Environmental Scientists*, Statistics in Practice. 2nd Edition, John Wiley & Sons, Chichester.
- [20] Zaksek; Schroedter-Homscheidt, 2009, Parameterization of air temperature in high temporal and spatial resolution from a combination of the SEVIRI and MODIS instruments, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4): 414-421.
- [21] Zhang, W; Huang, Y; Yu, Y; Sun, W. 2011, Empirical models for estimating daily maximum, minimum and mean air temperatures with MODIS land surface temperatures. *International Journal of Remote Sensing*, 32(24): 9415-9440.

논문접수 : 2014.01.14

수정일 : 2014.02.19

심사완료 : 2014.02.27