

온난 및 한랭시즌의 우리나라 지상기온 평가 알고리즘 개발

Development of Estimation Algorithm of Near-Surface Air Temperature for Warm and Cold Seasons in Korea

김도용
Kim, Do Yong

요 旨

시공간적 기온정보는 지구온난화와 기후변화의 이해에 있어서 중요한 기상요소이다. 본 연구에서는 인공위성 원격탐사로부터 획득된 공간적으로 균질한 지표면 정보를 이용하여 우리나라 지상기온 평가 알고리즘을 개발하였다. LST(Land Surface Temperature), NDWI(Normalized Difference Water Index), NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)를 독립변수로 하는 지상기온 추정을 위한 다중회귀모형을 제안하고, 우리나라의 지역기후변화를 고려하기 위하여 온난시즌과 한랭시즌에 대한 모형의 회귀상수 및 회귀계수를 도출하였다. 개발된 기온 추정 알고리즘에 의해 산출된 온난 및 한랭시즌의 기온정보는 지상관측기온과 비교하여 우수한 상관관계를 보였고, 3°C 미만의 RMSE와 거의 0에 가까운 BIAS로 매우 높은 일치성을 보였다. 따라서 인공위성 지표면 원격탐사자료를 활용하고 온난 및 한랭시즌의 구분을 적용한 기온 평가 알고리즘은 우리나라의 지역기후를 평가하는데 있어서 간략하고 유용한 수단이 될 수 있으리라 기대된다.

핵심어 : 기온, 인공위성 원격탐사, 회귀알고리즘, 온난 및 한랭시즌

Abstract

Spatial and temporal information on near-surface air temperature is important for understanding global warming and climate change. In this study, the estimation algorithm of near-surface air temperature in Korea was developed by using spatial homogeneous surface information obtained from satellite remote sensing observations. Based on LST(Land Surface Temperature), NDWI(Normalized Difference Water Index) and NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) as independent variables, the multiple regression model was proposed for the estimation of near-surface air temperature. The different regression constants and coefficients for warm and cold seasons were calculated for considering regional climate change in Korea. The near-surface air temperature values estimated from the multiple regression algorithm showed reasonable performance for both warm and cold seasons with respect to observed values (approximately 3°C root mean-square error and nearly zero mean bias). Thus, the proposed algorithm using remotely sensed surface observations and the approach based on the classified warm and cold seasons may be useful for assessment of regional climate temperature in Korea.

Keywords : Air Temperature, Satellite Remote Sensing, Regression Algorithm, Warm and Cold seasons

1. 서 론

지속적인 산업활동에 따른 온실가스 배출량 증가는 전지구적인 기온상승을 야기하였으며, 지구온난화와 기후변화로 인한 이상기상/기후현상은 각종 재난/재해를 유발하여 인류의 생존을 위협하는 전지구적인 환경문제로 대두되고 있다(IPCC, 2007). 이에 따라, 전세계적으로 국가 및 지역기후변화를 파악하고 기후변화에

대응하기 위한 노력이 경주되고 있으며, 정확하고 상세한 기온정보는 기후변화에 대한 이해와 파악에 있어서 필수적인 기상 및 기후학적 요소이다(Yan et al., 2009; Vancutsem et al., 2010).

우리나라는 유인기상관측소, 자동기상관측소, 고층기상관측소 등에서 기온정보를 생산하고 있으며, 지상기온의 경우 백엽상 기준의 지상으로부터 1.5m에서 관측을 수행하고 있다. 또한, 우리나라 기상청은 전국에 약

Received: 2015.07.28, revised: 2015.10.06, accepted: 2015.10.27

* 정희원 · Mokpo대학교 환경공학과(기후변화연구소) 교수(Member, Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, dykim1975@mokpo.ac.kr)

550여개의 지상기상관측장비를 설치하여, 전국 평균 13km 간격의 매우 높은 밀도로 기온을 포함한 기상현상을 관측하고 있다(KMA, <http://www.kma.go.kr/>). 그러나 우리나라는 지형·지리학적으로 국토면적 대비 산악지형이 많고 삼면이 바다에 접해 있기 때문에 매우 복잡하고 다양한 국지적 기상현상이 나타난다. 이처럼 국토면적이 좁고 복잡지형의 경우에는 지상관측밀도의 공간적 제약이 발생하게 되고, 공간적으로 상세하고 균질한 기온정보를 생산하는데 한계가 있다(Lakshmi et al., 2001; Yan et al., 2009).

최근에는 인공위성 원격탐사를 기반으로 한 상세하고 균질한 공간정보의 생산과 보급이 활성화되면서, 이를 활용하여 지상관측이 갖는 공간적인 제약을 극복하고자 하는 다양한 노력이 시도되고 있다. 예를 들어, 인공위성 원격탐사로부터 획득된 지표면 온도(Land Surface Temperature, 이하 LST)를 이용하여 기온을 산출하거나(Florio et al., 2004; Mostovoy et al., 2006), LST와 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, 이하 NDVI)를 복합적으로 이용하여 기온을 산출하는 등의 연구가 이루어져 왔다(Stisen et al., 2007; Nieto et al., 2011). 그러나 대부분의 선행 연구에서는 특정 기간 및 국지적 기온 산출에 한정되어 있다.

우리나라는 중위도 온대지역에 위치하여 해양성 및 대륙성 기단, 열대 및 한대기단의 영향이 복합적으로 작용하는 계절에 따른 기후학적 특징이 나타난다. 따라서 계절적 특징을 고려한 기온 정보의 생산이 필요하다. 그러나 최근 지구온난화와 기후변화로 인하여, 봄과 가을이 짧아지고 여름이 길어지는 등 우리나라의 계절변동에도 이상 징후가 감지되고 있다. 따라서 본 연구에서는 인공위성 원격탐사자료를 기반으로 공간적으로 상세하고 균질한 기온추정 기법을 개발함에 있어서, 온난 및 한랭시즌으로 구분하여 우리나라의 기후변화를 고려한 지상기온 평가 알고리즘을 제안하고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

본 연구에서는 지상관측기온과 인공위성 원격탐사자료를 이용하여 기온 산출을 위한 통계기반의 간략화 회귀 알고리즘을 개발하고자 한다. 이를 위하여 지상관측기온은 우리나라 전역에 분포해 있는 기상청 산하 76개의 유인기상관측소로부터 획득하였으며(Figure 1), 인공위성 원격탐사자료는 지표면의 대표적인 특성인 온도, 습도, 식생 정보로써 LST, 정규수분지수(Normalized Difference Water Index, 이하 NDWI), NDVI를 사용하였다. LST는 Terra 위성의 MODIS

(MODerate Resolution Imaging Spectroradiometers)로부터 생산된 Level-3 MOD11A1 자료로부터 획득하였고, NDWI 및 NDVI는 SPOT 위성의 VGT (VEGETATION) S10(10-day product)을 기반으로 생산된 자료를 사용하였다(Kim and Han, 2012, 2013). 여기서 NDVI는 Red 및 Near Infrared로부터 생산된 자료이며, NDWI는 Near Infrared 및 Shortwave Infrared로부터 생산된 자료이다.

지상관측자료는 관측지점별 시간적 연속자료이고, 인공위성 원격탐사자료는 1km×1km의 수평해상도를 갖는 공간자료이기 때문에, 본 연구에서는 두 자료간의 시공간적 매치를 위하여 자료의 전처리를 수행하였다(Zhao et al., 2002; Darecki and Stramski, 2004; Yu et al., 2009). 시간적으로는 기 확보된 우리나라 전역을 포함하는 인공위성 원격탐사자료를 활용하기 위하여 2006년도 1년 간(365일)을 대상으로 Terra 위성이 우리나라 상공을 통과하는 10시 이후의 정오 시간대(View Time)를 고려하여 지상관측자료를 추출하였으며, 공간적으로는 지상관측지점의 위치정보(위·경도)를 바탕으로 인공위성 원격탐사자료의 각 격자에 해당하는 관측 지점을 식별하였다.

본 연구에서는 식 (1)의 통계적 다중회귀함수에 기반하여, 기온 추정 알고리즘을 개발하고 검증하였다(Han et al., 2005; Kim and Han, 2013).

$$y = A + \sum_{i=1}^n f(X_i) \quad (1)$$

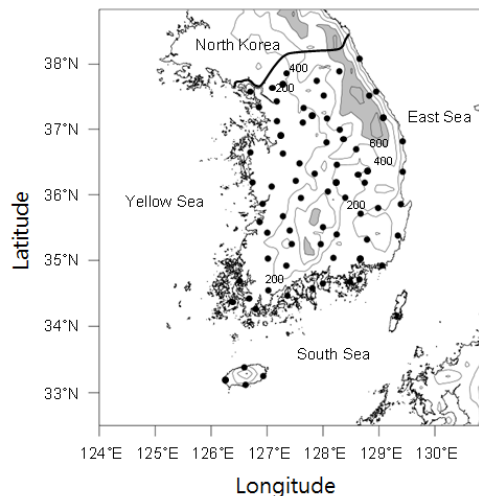


Figure 1. Location of meteorological stations(dots) with orography(contours) over Korea

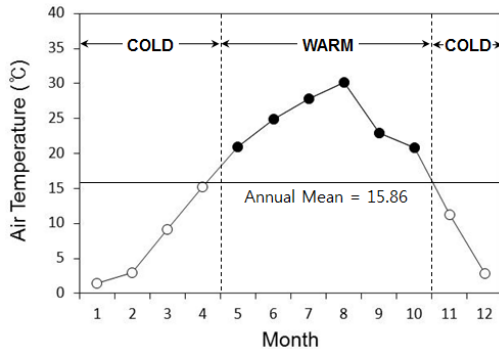


Figure 2. Monthly variations in the spatially averaged air temperature over Korea in 2006

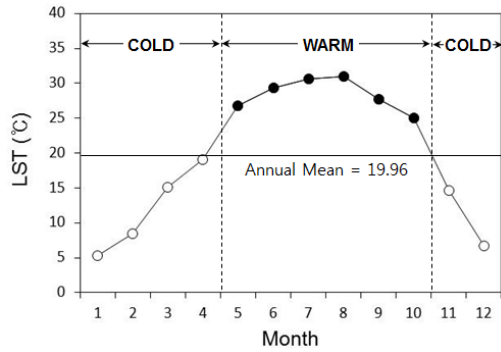


Figure 3. Monthly variations in the spatially averaged LST over Korea in 2006

여기서, y 는 종속변수이며, A 는 회귀상수이다. $f(X_i) = B_i X_i$ 로 독립변수인 X 와 회귀계수 B 에 의해 정의되며, 이에 따라 독립변수항은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\sum_{i=1}^n f(X_i) = B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n \quad (2)$$

서론에서도 언급했듯이 지구온난화와 기후변화에 의한 우리나라의 계절변동성을 고려하기 위하여, 본 연구에서는 연평균 기온을 기준으로 연중 기간을 온난 및 한랭시즌으로 구분하였다(Fig. 2). 본 연구에서 사용한 인공위성자료와 시공간적으로 매치된 2006년도 지상관측기온으로부터 산출된 우리나라의 연평균 기온은 15.86°C로 연평균 보다 높은 기온 분포를 보이는 5~10월은 온난(WARM)시즌으로 구분되었고, 연평균 보다 낮은 기온분포를 보이는 1~4월 및 11월과 12월은 한랭(COLD)시즌으로 구분되었다. 또한, 온난 및 한랭 시즌에 대하여 종속변수로서 지상관측기온과 독립변수로서 인공위성 원격탐사자료를 적용한 다중회귀분석을 수행하고, 각 시즌에 대한 회귀상수와 독립변수별 회귀계수를 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

지표면 부근의 기온(지상기온)은 지구복사 즉, 지표면으로 부터의 복사에너지에 의해 직접적인 영향을 받는다. 따라서 LST는 지상기온을 산출하는데 있어서 주요 독립변수로서의 역할을 하게 된다. Fig. 3에 보인 바와 같이, 정오 시간대의 우리나라의 연평균 LST는 기온보다 약 4°C 정도 높은 수준이며, 기온과 매우 유사

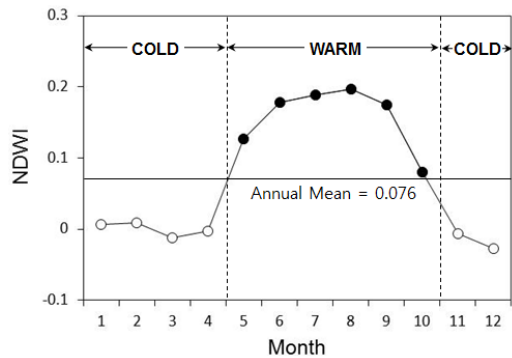


Figure 4. Monthly variations in the spatially averaged NDWI over Korea in 2006

한 월변동의 양상을 보인다. 또한, 기온의 경우와 마찬가지로, 여름을 포함하는 온난시즌의 월평균 LST는 연평균 값인 19.96°C 보다 높은 값들을 보였으며, 온난시즌의 평균 LST는 28.39°C로 나타났다. 겨울을 중심으로 하는 한랭시즌의 LST도 기온의 경우와 마찬가지로 연평균 값보다 낮은 수준이었으며, 한랭시즌의 평균 LST는 11.53°C로 나타났다.

Fig. 4에 보인 지표면의 습윤 정도를 나타내는 NDWI의 경우, 연평균 값은 0.076이었으며, 온난시즌에는 연평균 보다 높고(온난시즌 평균=0.158), 한랭시즌에는 연평균 보다 낮음(한랭시즌 평균=-0.006) 분포를 보이는 등 기온과 유사한 월변동 양상을 보였다. 즉, 온난시즌에는 연평균 대비 습윤상태를 나타내었고, 한랭시즌에는 연평균 대비 건조상태를 나타내었다. 이는 여름철에는 북태평양으로부터 유입되는 해양성 열대기단의 영향으로 고온다습하며, 겨울철에는 시베리아로부터 유입되는 대륙성 한대기단의 영향으로 한랭건조한 우리나라의 전형적인 기후학적 특성에 기인한 결과

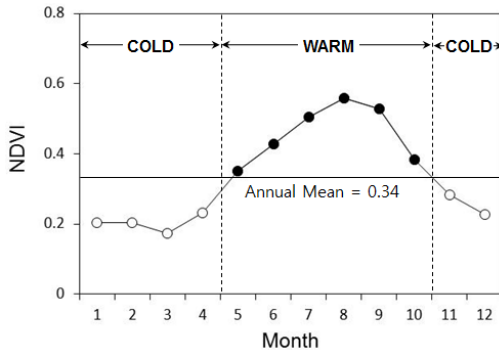


Figure 5. Monthly variations in the spatially averaged NDVI over Korea in 2006

라 할 수 있다.

토지피복은 지표면의 온·습도 및 국지적 기상현상에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 특히, 식물성장에 따른 지표면 식생분포의 연중 변동은 지표면의 알베도 및 지구복사에 영향을 미친다. 따라서 지표면 식생정보는 지표면 온·습도 정보와 함께 지상기온을 산출하는데 있어서 중요한 지표 강제력을 갖는 요소 중 하나이다. Fig. 5는 지표면 식생정보로서 NDVI의 월변동을 나타낸 것이다. 연평균 NDVI값은 0.34이었으며, 식물이 성장을 시작하는 봄 부터 상승하기 시작하여 8월에 0.56으로 최고값을 보이고 다시 가을부터 하강하는 등 기온과 유사한 월변동 양상을 보였다. 온난시즌에는 평균 0.46으로 연평균 보다 높고, 한랭시즌에는 평균 0.22로 연평균 보다 낮은 분포를 보였다.

상기의 결과로부터, 본 연구에서 대상으로 한 인공위성 원격탐사자료인 LST, NDWI, NDVI는 모두 지상기온과 유사한 월변동 양상을 보였으며, 연평균 값을 기준으로 온난 및 한랭시즌으로 구분이 가능하여, 온난 및 한랭시즌을 대상으로 한 우리나라 지상기온 추정에 있어서 충분히 유효한 인자로 평가된다. 따라서 본 연구에서는 식 (1)과 (2)의 다중회귀함수에 기반한 간략화 통계모형으로, LST, NDWI, NDVI를 독립변수로 하는 기온 추정 알고리즘을 개발하였으며, 다중회귀식은 다음과 같다.

$$Temp = A + B_1 LST + B_2 NDWI + B_3 NDVI \quad (3)$$

여기서, $Temp$ 는 종속변수로서 지상기온에 해당되며, A 는 회귀상수이다. B_1, B_2, B_3 는 각각 독립변수인 LST, NDWI, NDVI에 대한 회귀계수이다. 온난 및 한랭시즌에 대한 회귀상수와 회귀계수는 식 (3)에 시즌

별 지상관측기온과 인공위성 원격탐사자료를 적용한 다중회귀분석을 통하여 도출되었으며, 각각 다음의 식 (4) 및 (5)와 같다.

$$(A, B_1, B_2, B_3)_{WARM} = (5.5818, 0.4690, 10.8758, 2.2035) \quad (4)$$

$$(A, B_1, B_2, B_3)_{COLD} = (-4.0895, 0.8102, 5.3227, 7.0448) \quad (5)$$

마지막으로, 제2장에서 서술한 전처리(지상관측자료와 인공위성 원격탐사자료 간의 시공간적 match-up) 자료로부터 온난 및 한랭시즌에 해당하는 자료를 각각 25%씩 무작위로 추출하여, 본 연구에서 개발한 회귀 알고리즘의 검증에 수행하였다. 식 (3)의 다중회귀식에

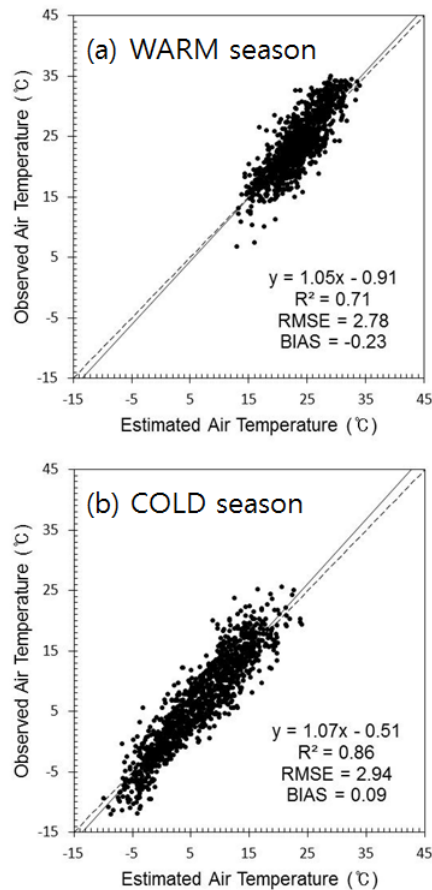


Figure 6. Scatterplots of the observed versus estimated air temperature for (a) WARM and (b) COLD seasons in 2006

식 (4)와 (5)의 시즌별 회귀상수와 회귀계수를 적용하여 지상기온을 산출하였다. 회귀 알고리즘에 의해 산출된 기온은 지상관측기온과의 비교를 통하여, 상관관계 (R2), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 편의(BIAS) 등의 기초통계량을 분석하고 유의성을 검증하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 회귀 알고리즘에 의해 산출된 기온과 지상관측기온과의 상관관계는 R2값이 온난시즌과 한랭시즌에 대하여 각각 0.71과 0.86으로 우수한 상관을 보였으며, 최적적합직선(추세선)은 그 기울기가 약 1에 가까운 값으로 점선으로 표시된 일대일 대응선과 거의 일치하였다. 또한, RMSE는 온난 및 한랭시즌에 대하여 각각 2.78℃와 2.94℃로 3℃ 미만이었으며, BIAS는 두 경우 모두 0에 가까운 값을 보였다. 따라서 본 연구에서 개발한 인공위성 지표면 원격탐사자료를 활용한 온난 및 한랭시즌의 지상기온 추정 알고리즘은 적정 수준에서 우리나라의 기온평가가 가능하다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지구온난화 및 기후변화의 핵심인자인 기온을 대상으로, 지상관측밀도의 공간적 한계를 극복하고 공간적으로 상세하고 균질한 기온정보의 생산 및 평가가 가능한 간략하고 유용한 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위하여, 인공위성 원격탐사로부터 획득된 상세하고 균질한 지표면 관측자료를 활용하여 통계기반의 기온 추정 회귀모형을 개발하고 그 유용성을 검증하였다.

본 연구에서 사용된 지상관측자료는 우리나라 전역에 분포해 있는 기상청 산하 유인기상관측소로부터 획득하였으며, 인공위성 원격탐사자료는 지표면의 대표적인 특성인 온도, 습도, 식생 정보로써 LST, NDWI, NDVI를 대상으로하였다. 또한, 모든 자료에 대하여 지상관측지점의 위경도 정보 및 인공위성이 우리나라 상공을 통과하는 시간대 등을 고려하여 전처리를 수행하였다. 기온 추정 알고리즘은 통계적 다중회귀함수에 기반하여 개발하였으며, 지구온난화와 우리나라의 기후변화를 고려하기 위하여 연평균 기온을 기준으로 연중기간을 온난 및 한랭시즌으로 구분하였다.

인공위성 원격탐사자료인 LST, NDWI, NDVI는 모두 지상기온과 유사한 월변동 양상을 보였으며, 연평균 값을 기준으로 한 우리나라의 온난 및 한랭시즌의 기후학적 특징을 반영할 수 있는 지표 강제력으로써의 유효인자로 평가되었다. 따라서 본 연구에서는 인공위성 원격탐사에 의한 LST, NDWI, NDVI를 독립변수로 하는

기온 추정 회귀 모형을 제안하고, 다중회귀분석을 통하여 온난 및 한랭시즌에 대한 모형의 회귀상수 및 각 독립변수별 회귀계수를 도출하였다. 개발된 회귀 알고리즘에 의해 산출된 기온정보는 지상관측기온과 비교하여 R2값이 0.7 이상으로 우수한 상관관계를 보였고, 3℃ 미만의 RMSE와 거의 0에 가까운 BIAS로 매우 높은 일치성을 보였다.

결론적으로, 본 연구에서 개발한 인공위성 지표면 원격탐사자료를 활용한 온난 및 한랭시즌의 지상기온 추정 알고리즘은 기후변화에 의한 우리나라의 계절 변동성을 고려한 것으로 기후모델링 및 지역기후변화 평가 등에 있어서 적용 및 활용이 가능할 것으로 사료된다. 또한, 본 알고리즘은 통계기반의 회귀모형으로 균질한 공간해상도를 갖는 지역별 상세 기온정보를 생산하는데 있어서 간략하고 유용한 수단이 될 수 있으리라 기대된다. 그러나 알고리즘의 정확도와 신뢰도 향상을 위하여 다년간의 인공위성 원격탐사자료의 적용과 주요 영향인자들의 추가 및 보완 등의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2015학년도 목포대학교 연구소 지원사업비 지원에 의하여 연구되었음,

References

1. Darecki, M. and Stramski, D., 2004, An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea, *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc., Vol. 89, No. 3, pp. 326-350.
2. Florio, E.N., Lele, S.R., Chang, Y.C., 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*, Taylor & Francis, Vol. 25, No. 15, pp. 2979-2994.
3. Han, K.-S., Viau, A.A., Kim, Y.-S., Roujean, J.-L., 2005, Statistical estimate of the hourly near-surface air humidity in eastern Canada in merging NOAA/AVHRR and GOES/IMAGER observations, *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, Vol. 26, No. 21, pp. 4763-4784.
4. IPCC, 2007, *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to Fourth Assessment Report of the Intergovernmental

- Panel on Climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
5. Kim, D.Y., Han, K.S., 2012, Temporal and Spatial Wind Information Production and Correction Algorithm Development by Land Cover Type over the Republic of Korea, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Korean Society for Geospatial Information System, Vol. 20, No. 3, pp. 19-27.
 6. Kim, D.Y., Han, K.S., 2013, Remotely sensed retrieval of midday air temperature considering atmospheric and surface moisture conditions, *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, Vol. 34, No. 1, pp. 247-263.
 7. KMA, Korea Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr/>
 8. Lakshmi, V., Czajkowski, K., Dubayah, R., Susskind, J., 2001, Land surface air temperature mapping using TOVS and AVHRR, *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, Vol. 22, No. 4, pp. 643-662.
 9. Mostovoy, G.V., King, R.L., Reddy, K.R., Kakani, V.G., Filippova, M.G., 2006, Statistical estimation of daily maximum and minimum air temperatures from MODIS LST data over the state of Mississippi, *GIScience and Remote Sensing*, V. H. Winston & Son, Inc., Vol. 43, No. 1, pp. 78-110.
 10. Nieto, H., Sandholt, I., Aguado, I., Chuvieco, E., Stisen, S., 2011, Air temperature estimation with MSG-SEVIRI data: Calibration and validation of the TVX algorithm for the Iberian Peninsula, *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc., Vol. 115, No. 1, pp. 107-116.
 11. Stisen, S., Sandholt, I., Norgaard, A., Fensholt, R., Eklundh, L., 2007, Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in West Africa, *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc., Vol. 110, No. 2, pp. 262-274.
 12. Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinku, T., Connor, S.J., 2010, Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa, *Remote Sensing of Environment*, Elsevier Inc., Vol. 114, No. 2, pp. 449-465.
 13. Yan, H., Zhang, J., Hou, Y., HE, Y., 2009, Estimation of air temperature from MODIS data in east China, *International Journal of Remote Sensing*, Taylor & Francis, Vol. 30, No. 23, pp. 6261-6275.
 14. Yu, Y., Tarpley, D., Privette, J.L., Goldberg, M.D., Raja, M.K.R.V., Vinnikov, K.Y. and Xu, H., 2009, Developing algorithm for operational GOES-R land surface temperature product, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE GRSS, Vol. 47, No. 3, pp. 936-951.
 15. Zhao, T.X.-P., Stowe, L.L., Smirnov, A., Crosby, D., Sapper, J. and McClain, C.R., 2002, Development of a global validation package for satellite oceanic aerosol optical thickness retrieval based on AERONET observation and its application to NOAA/NESDIS operational aerosol retrievals, *Journal of the Atmospheric Sciences*, AMS, Vol. 59, No. 3, pp. 294-312.