

대기보정된 Landsat 위성영상을 이용한 해수온도 분석

The Analysis of Sea Surface Temperature Distribution Using Atmospheric Corrected Landsat Imagery

김기홍¹⁾ · 홍성창²⁾ · 윤준희³⁾

Kim, Gi Hong · Hong, Sung Chang · Youn, Jun Hee

Abstract

There are many problems in monitoring environmental change around of nuclear power station, because interesting area is coastal and relatively large. The ground resolution of Landsat ETM+ imagery is high (30 m), but this imagery does not have enough informations for conducting atmospheric correction in evaluating sea surface temperatures. On the other hand, while it is possible to conduct atmospheric correction using MODIS imagery with it's two infrared bands, it's resolution is relatively low (1 km). Therefore, atmospheric corrected high resolution temperature information can be obtained from these two satellite images. In this study, digital numbers of Landsat ETM+ data in interesting area are georeferenced, converted to effective temperatures based on radiance value, and then the atmospheric correction is conducted using MODIS data. As a result, about 3.5°C temperature differences were detected in comparing sea surface temperature of the surrounding area of Uljin nuclear power station with it of the same area located 5km far east.

Keywords : Landsat ETM+, MODIS, atmospheric correction, sea surface temperature, nuclear power station

초 록

원자력 발전소의 주변 지역은 해안지역이고 비교적 광범위하므로, 환경 변화를 감시하는데 많은 어려움이 있다. Landsat ETM+영상은 해상도가 30m 급이나 온도정보 추출에 있어 대기보정을 못하는 문제를 가지고 있다. MODIS 영상의 경우 2개의 적외선 밴드를 이용하여 대기보정된 비교적 정확한 온도를 추출할 수 있으나 해상도가 1km이다. 따라서, 두 위성영상의 자료를 이용한다면 대기보정된 고해상도의 온도자료를 추출할 수 있다. 본 연구에서는 대상지역의 Landsat ETM+영상에 대하여 기하보정을 수행하고, 방사휘도 및 온도를 산정한 후 MODIS영상을 이용하여 대기보정을 수행하였다. 그 결과 울진 원자력발전소 주변 연근해 지역과 온배수의 영향을 받지 않는 동쪽으로 5km 떨어진 동일 면적의 지역과 비교하여 보았을 때 약 3.5°C 높은 것을 알 수 있었다.

핵심어 : Landsat ETM+, MODIS, 대기보정, 해수면온도, 원자력발전소

1. 서 론

위성영상을 활용하여 온도정보를 추출할 경우 인공위성의 센서에 감지되는 전자기파 중에는 태양복사 에너지와 지구복사 에너지 모두 존재하게 된다. 하지만 이중 정

확하게 지구 복사 에너지만 감지할 수 있다면 정확한 표층 해수면의 온도 산정이 가능하다(Trisakti, 2004). 육지의 경우 지구복사 에너지와 태양복사 에너지를 동시에 방사하기 때문에 정확한 온도산정이 어렵다. 그러나 강이나 호수 바다등과 같은 물의 경우 열적외선 파장에서 흑체에

1) 정회원 · 강릉대학교 공과대학 토목공학과 조교수, 공학박사(E-mail:ghkim@kangnung.ac.kr)

2) 연결저자 · 정회원 · (주)한국IMU 공간정보연구소 연구원, 공학석사(E-mail:schong@imukorea.com)

3) 정회원 · 삼성SDS 전략컨설팅실 책임컨설턴트, 공학박사(E-mail:junhee.youn@samsung.com)

가까운 성질을 지니고 있을 뿐만 아니라 태양복사 에너지를 모두 흡수하고 지구 복사에너지를 방출하기 때문에 열적외선 센서로 취득된 위성영상을 이용한다면 수온을 비교적 정확하게 계산할 수 있다.

Landsat ETM+ 위성영상의 열적외선 파장은 단일밴드(Band 6)로, 자체적으로는 대기의 영향에 대한 보정이 불가능하지만 공간해상도가 MODIS 영상과 비교하여 높다는 장점을 가지고 있다. 반면에, MODIS 위성영상은 열적외선 파장이 두개의 밴드(Band31, Band32)로 이루어져 있기 때문에 Landsat ETM+ 영상과 달리 자체적으로 대기보정이 가능하여 보다 정확한 해수온도의 추출이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 해상도가 1km로, 소규모지역에 대한 자세한 정보를 추출하기에는 부적합하다고 할 수 있다. 따라서 Landsat ETM+ 영상과 MODIS 영상의 장점만을 이용하여 해수 온도의 추출이 가능하다면 소규모지역에 대하여 보다 정확한 온도 정보를 얻을 수 있을 것으로 생각되며, 이러한 정보를 이용하여 원자력 발전소의 온배수 영향을 받는 지역에 대하여 적용한다면 보다 정확하게 온배수의 영향을 받는 지역의 분포를 분석할 수 있을 것으로 생각된다.

연구사례로는 Landsat 위성영상을 이용하여 원자력 발전소 지역에서 온배수 영향을 받는 지역과 받지 않는 지

역의 온도차이가 평균 2.0°C 발생한다는 결과가 있었으나 Landsat 위성영상의 대기보정은 고려하지 않았다(최승필 등, 2007). Landsat 시계열 영상을 통하여 한강수계 호수 수온과 계절적 성층현상을 분석하였으며(이훈열 등, 2005), 대기보정에 관한 연구로는 위성영상 대기보정을 위하여 복사량을 계산하였고(김영섭, 1998), 대기복사 모형을 이용하여 위성영상의 대기보정에 관한 연구결과(오성남, 2004)가 발표되었다. 본 논문은 Landsat ETM+ 영상에 대한 온도자료 산출에 있어서 MODIS 자료를 이용한 영상의 대기보정을 통하여 보다 정확한 온도값을 산출해내고 울진 원자력발전소의 온배수 영역에 대하여 정확한 분석과 분포 특성을 파악하는데 그 목적이 있다. 그림 1은 본 논문의 자료처리 흐름도이며 그림 2는 대상지역의 MODIS 영상과 Landsat 영상의 공간적 범위이다.

2. 해수표면온도 산출의 이론적 배경

지구에서 방출되는 열복사 에너지는 11 μ m 부근에서 최대값을 가진다. 따라서 10~12 μ m 파장대를 관측하면 수면에서 방출되는 복사에너지를 측정할 수 있고 이를 통하여 표층수면의 온도를 추정할 수 있다(Honjo, 2005). Landsat 위성영상의 경우 Band 6이 이에 해당한다고 할

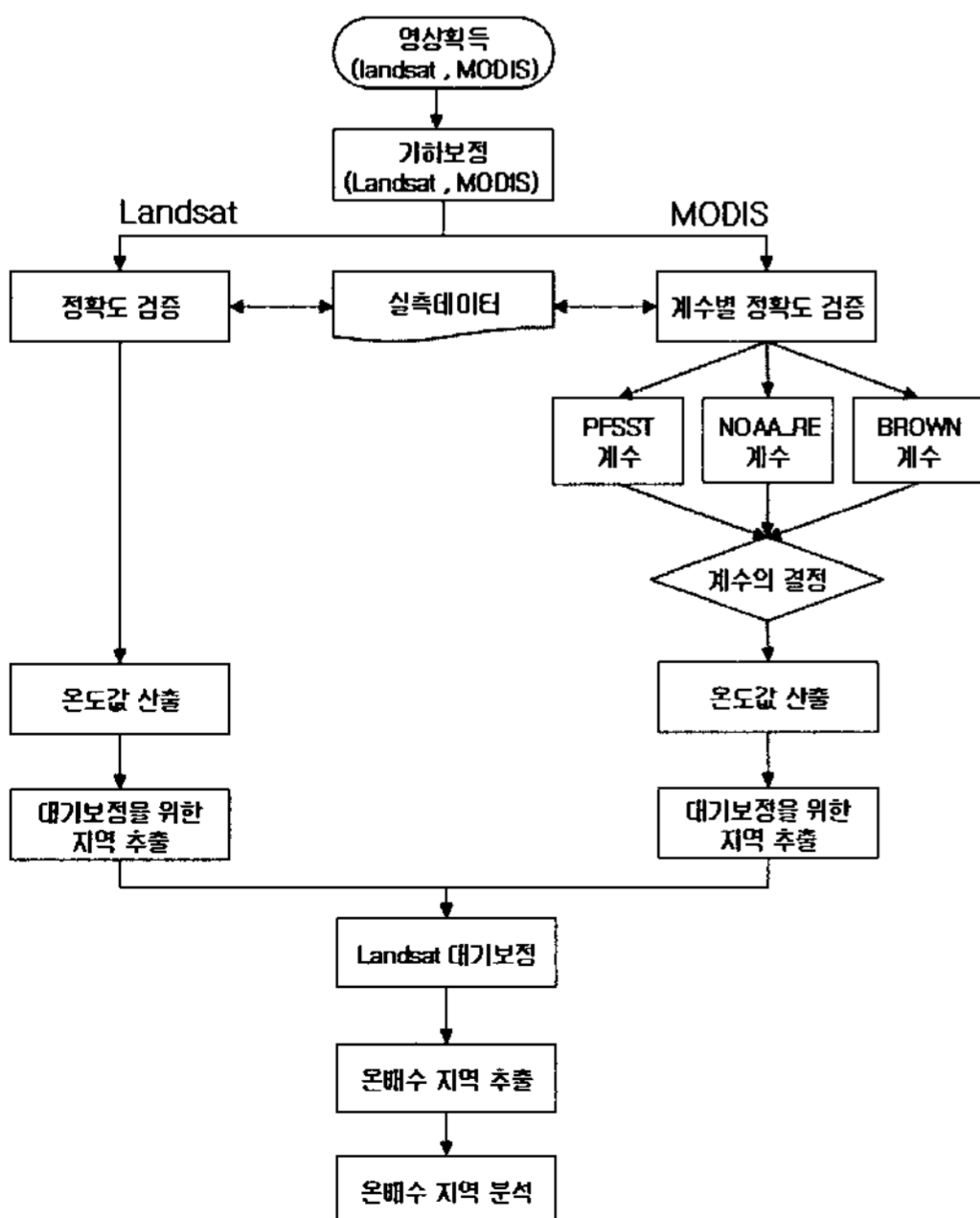


그림 1. 연구 흐름도



그림 2. 영상의 공간범위

수 있다. Landsat 영상의 표층수온 산출방법에 대한 연구 사례에 따르면, 산출방법에는 크게 NASA방법, RESTEC 방법, Quadratic방법의 3가지가 있다. 본 연구에서는 시계열 Landsat ETM+ 영상에 대하여 가장 합리적인 방법인 NASA 경험식을 적용하여 시공간적 온도를 산정하였다. MODIS 영상의 경우 Band 31, 32가 열적외 영역에 해당하며 MCSST(Multi Channel Sea Surface Temperature)식을 온도산출에 적용하였다. 휘도온도의 단위는 섭씨온도(°C)를 이용하였다.

Landsat의 온도를 산출함에 있어서 먼저 영상의 DN(Digital Number)값을 복사휘도(radiance)로 변환하여야 한다. DN값이란 위성영상에서의 해당 영상소에 해당하는 디지털 정보값이다. 복사휘도로 변환하는 식은 식 (1)과 같으며, 식 (1)에서 $QCAL$ 과 $ACLAMAX$ 은 각각 Landsat 영상의 DN값과 최대 DN값이다. 또, $LMAX_\lambda$ 와 $LMIN_\lambda$ 은 각각 DN값의 최대, 최소 복사휘도이다. 식 (2)는 NASA 경험식이며 K_1 과 K_2 는 보정계수이다. L_λ 은 식 (1)의 복사휘도이다.

$$L_\lambda = ((LMAX_\lambda - LMIN_\lambda) / (QCALMAX - QCALMIN)) \times QCAL + LMIN_\lambda \quad (1)$$

$$Temp(K) = K_2 / \ln(K_1 / L_\lambda + 1) \quad (2)$$

MODIS 영상의 경우 복사휘도의 값은 식(3)으로 계산되며 Radiance_Scale은 복사휘도의 축척계수이다. SI는 MODIS의 DN값이고, Radiance_Offset은 복사휘도 차감계수이다.

$$Radiance = Radiance_Scale \times (SI - Radiance_Offset) \quad (3)$$

계산된 복사휘도 값을 통하여 BAND 31, 32의 절대온도를 산출한다. 각 밴드의 절대온도를 산출하는 방법은 식 (4)와 같다. 여기서 C_1 과 C_2 는 보정계수($C_1=1.1910439 \times 10^{-16} \omega m^{-2}$, $C_2=1.4387686 \times 10^{-2} mk$)이며, Radiance는 복사휘도, λ 는 파장이다(Band 31 = 11.03 μm , Band 32=12.02 μm).

$$BT = C_2 / (\lambda \times \log[C_1 / (\lambda^5 \times Radiance \times 10^6) + 1.0]) \quad (4)$$

MODIS영상의 대기보정된 최종온도를 구하는 식은 식 (5)와 같다. TB_{31} 은 Band 31의 값이고, TB_{3132} 은 BT31

과 BT32의 차이를 나타낸 값이다. θ 는 위성천정각을 나타내며, a_1, a_2, a_3, a_4 은 MCSST식에 사용되는 보정계수이다.

$$MCSST = a_1 + a_2 \times TB_{31} + a_3 \times TB_{3132} + a_4 \times (\sec \theta - 1) \times TB_{3132} \quad (5)$$

3. 위성영상 온도자료의 정확도 검증

영상자료의 정확도를 검증하기 위해서는 해수표층에 대한 실측온도 자료가 필요하다. 본 연구에 사용된 실측온도 자료는 국립해양조사원에서 제공하는 연안정지해양관측자료이며 연안의 29개 조위관측소에서 매일 9시경에 관측한 수온 자료이다.

3.1 MODIS 영상 온도자료의 정확도 검증

MCSST 식을 이용하여 표층수온을 산정하는 방법에 있어 계수의 결정은 상당히 중요하다. MODIS 영상의 수온산정 계수를 구하는 방법은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫째는 현재 기상청에서 수신한 NOAA/AVHRR 해수 온도자료를 참값으로 보고 MODIS의 자료를 분석하여 작성된 새로운 회귀계수 식을 통하여 계수를 산정하는 방법이다(정주용 등, 2002). 본 논문에서는 이렇게 산정된 계수를 NOAA_RE로 칭한다. 둘째는 Brown and Minnett(1999)가 경험적인 방법에 의하여 제시한 계수를 이용하는 방법으로, 본 논문에서는 이를 Brown계수로 칭한다. 셋째는 NASA에서 위성이 발사되기 전 이론적인 모사를 통해 산출한 PFSST(PathFinder SST)의 회귀계수를 이용하는 방법이다. 이들 세 가지 계수산정 방법 중 어떠한 방법을 본 논문에 적용할 것인지 검증하기 위해 다음과 같이 비교, 분석 하였다.

표 1~표 3은 각각의 방법을 통해 산정된 계수는 나타낸 표이고, 그림 3~그림 5는 해수의 실측 수온과 세 가지 계수를 이용하여 계산된 수온을 비교한 그래프이다.

NASA에서 제안한 PFSST 알고리즘은 해수면 온도를 높게 계산하는 경향이 나타났으며 Brown계수는 부분적으로 좋은 결과를 보였으나 전체적으로 볼 때 실제온도 값과 약간의 차이를 보였다. NOAA_RE 계수를 사용한 경우 실측온도와 약간의 오차를 보였으나, 편차 값이 비교적 일정하였다. 상관계수에 있어서도 NOAA_RE계수 0.9522, BROWN계수 0.8442, PFSST계수 0.8665로,

NOAA_RE계수가 다른 두 가지 계수보다 양호한 결과를

보임에 따라 MODIS의 온도 산정에 사용될 계수로 NOAA_RE계수를 선정하여 본 연구에 적용하였다.

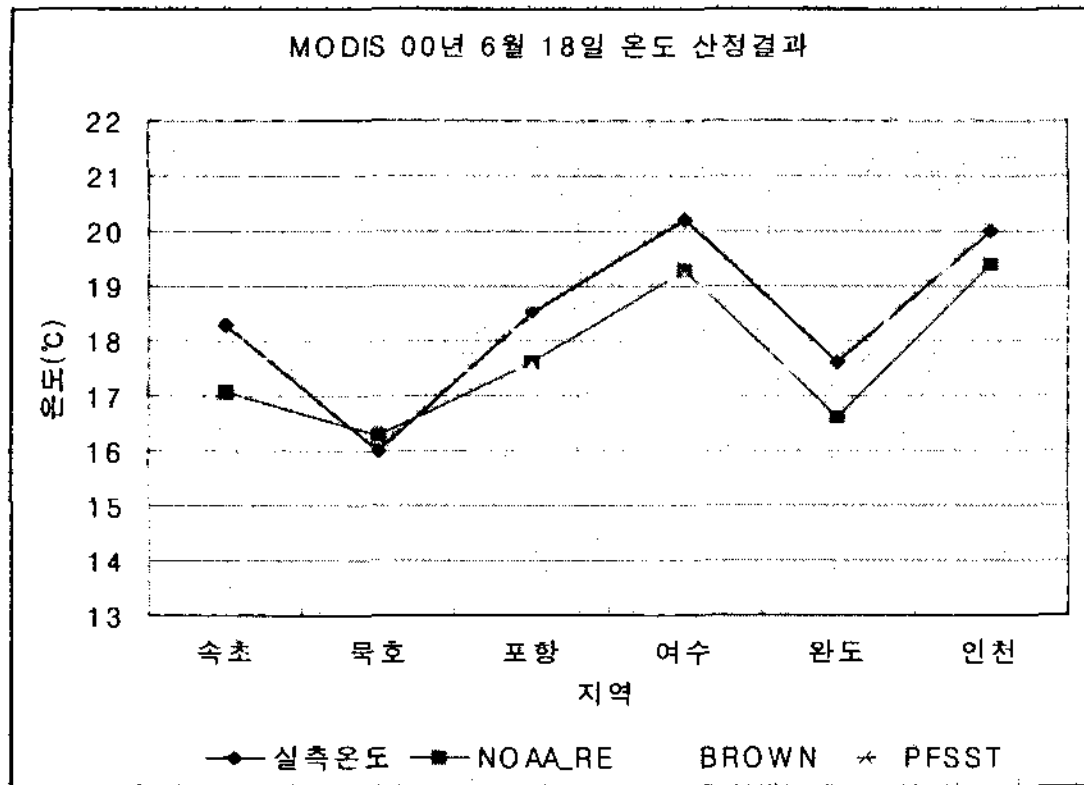


그림 3. MODIS 영상의 2000년 6월 18일 계수별 온도 산정결과

3.2 Landsat ETM+ 영상 온도자료의 정확도 검증

NASA 식을 이용한 Landsat ETM+의 온도자료에 대하여 실측온도와 얼마나 일치하는지 정확도 검사를 실시하였다. 국립해양조사원에서 제공하는 실측자료 중 Landsat ETM+영상이 포함하고 있는 지역은 속초와 목호를 포함하고 있으며, 두 지역에 대하여 정확도를 검증하였다.

Landsat ETM+ 영상의 온도자료는 실측온도에 비하여 상당히 낮게 측정이 되었으며, NASA식으로 산출해낸 온도 값을 실측온도와 비교하여 볼 때 평균 3.5°C 정도의 오차를 보이고 있다. 이러한 결과가 나타난 것은 대기적 요인에 의하여 온도값이 대부분 낮게 측정된 것으로 생각

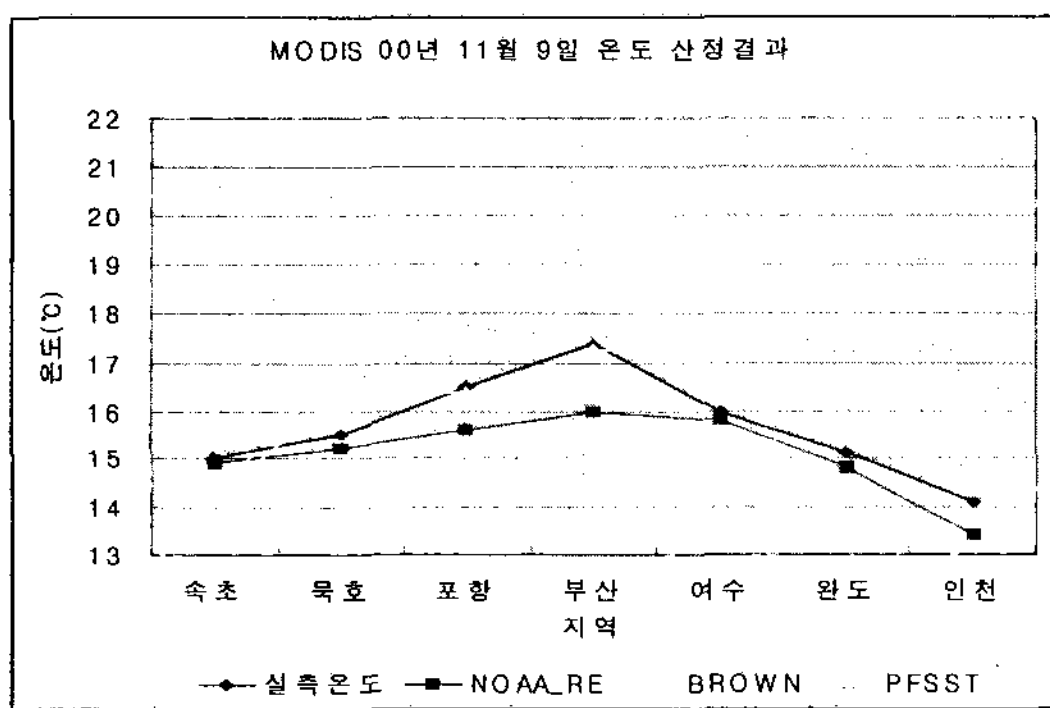


그림 4. MODIS 영상의 2000년 11월 9일 계수별 온도 산정결과

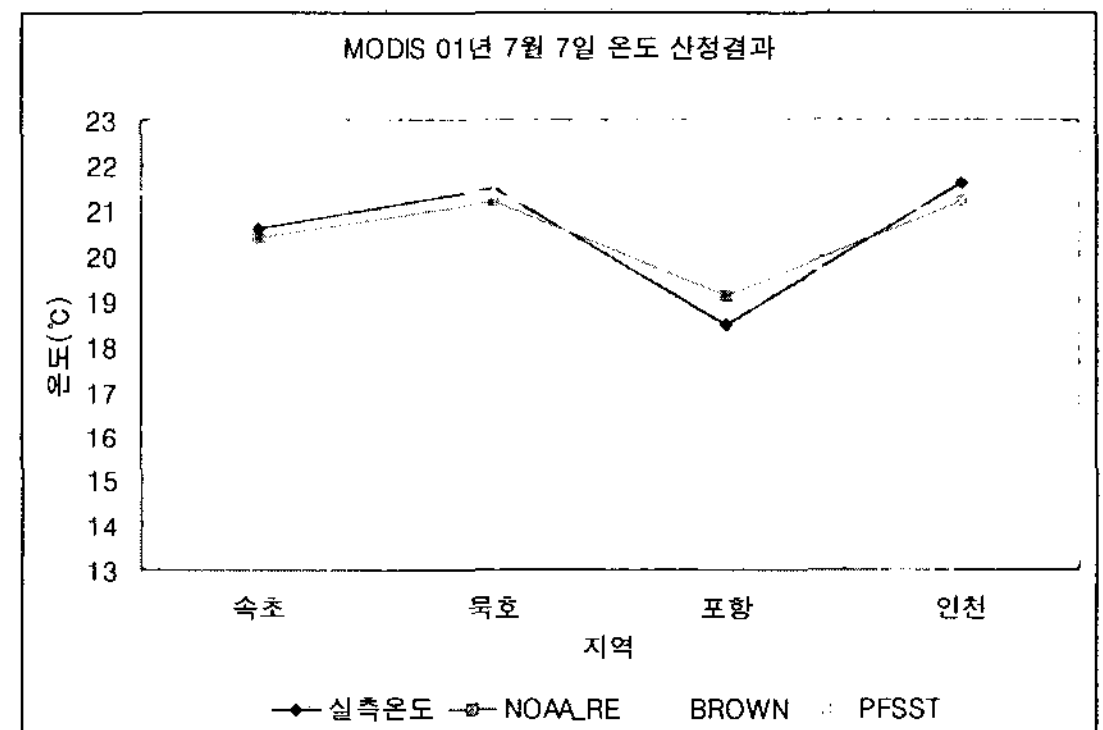


그림 5. MODIS 영상의 2001년 7월 7일 계수별 온도 산정결과

표 1. NOAA영상의 온도자료를 통한 MODIS 회귀계수(NOAA_RE)

a_1	a_2	a_3	a_4
-1.68848	1.013560	2.108080	1.249500

표 2. Brown and Minnett가 제시한 MODIS 회귀계수(BROWN계수)

	a_1	a_2	a_3	a_4
$TB_{1112} \leq 0.7$	1.0520	0.984	0.130	1.860
$TB_{1112} > 0.7$	1.8860	0.938	0.128	1.094

표 3. NASA에서 제공한 PFSST의 MODIS 회귀계수(PFSST계수)

	a_1	a_2	a_3	a_4
$TB_{1112} \leq 0.7$	1.228552	0.9576555	0.1182196	1.774631
$TB_{1112} > 0.7$	1.692521	0.9558419	0.0873854	1.199584

된다. 또, 상관성 분석에 있어서도 상관계수가 0.823으로 나타난 것으로 보아 MODIS영상의 정확도보다 떨어진다고 할 수 있다.

4. 대기보정된 Landsat 자료를 이용한 발전소 온배수 분석

4.1 MODIS를 이용한 Landsat ETM+ 대기보정

Landsat 위성의 경우 열적외선 영역을 담당하는 Band 6은 단일 밴드로서 자체적으로 대기보정이 어렵다. 그러나 MODIS 위성의 경우 열적외선 영역을 담당하는 밴드는 Band 31과 Band 32로서 두개의 밴드를 이용하여 자체적으로 대기보정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 동일지역이며 동일시간대 임에도 불구하고 Landsat ETM+영상의 온도자료와 MODIS 영상의 온도자료를 추출하여 비교하여 보면 식 (6)과 같이 차이가 발생하게 된다. 이때 발생하는 차이의 대부분은 대기보정에 의한 오차라고 할 수 있으며 식 (7)과 같이 이러한 차이를 Landsat ETM+에 보정시켜 준다면 MODIS보다 고해상도인 Landsat ETM+영상 또한 온도자료에 대하여 대기보정이 가능하다.

$$\Delta T = MODIS SST - Landsat SST \quad (6)$$

$$Landsat_{atm} = Landsat SST + \Delta T \quad (7)$$

MODIS 영상을 이용하여 Landsat ETM+ 영상의 온도 자료를 대기보정한 결과 대기보정 전의 평균오차는 3.5°C 이었으나, 대기보정 후의 평균오차는 0.5°C로 상당히 실측값과 가까워졌다는 것을 알 수 있다. 따라서 MODIS 영상을 이용하여 보정한 Landsat ETM+ 영상의 온도 자료는 보다 신뢰할 수 있는 자료라고 판단된다.

4.2 울진 원자력발전소 온배수 분석

울진 원자력발전소는 우리나라의 6개의 원자력 발전소 중 비교적 큰 규모에 속하므로 온배수 또한 많은 양을 방출할 것으로 예상된다. 온배수 영역을 분석하는데 사용된 영상은 대기보정된 Landsat ETM+영상이며, 상당히 넓은 지역을 포함하고 있으므로 원자력발전소의 온배수 지역을 중심으로 추출이 이루어졌다. 온배수 분석의 연구대상지역은 2007년 최승필의 연구지역과 동일한 지역으로 설정하였다. 그림 8에서 A지역은 온배수의 영향을 받는 지역이며, B지역은 온배수의 영향을 받지 않는 지역으로 A지역의 비교대상이 된다.

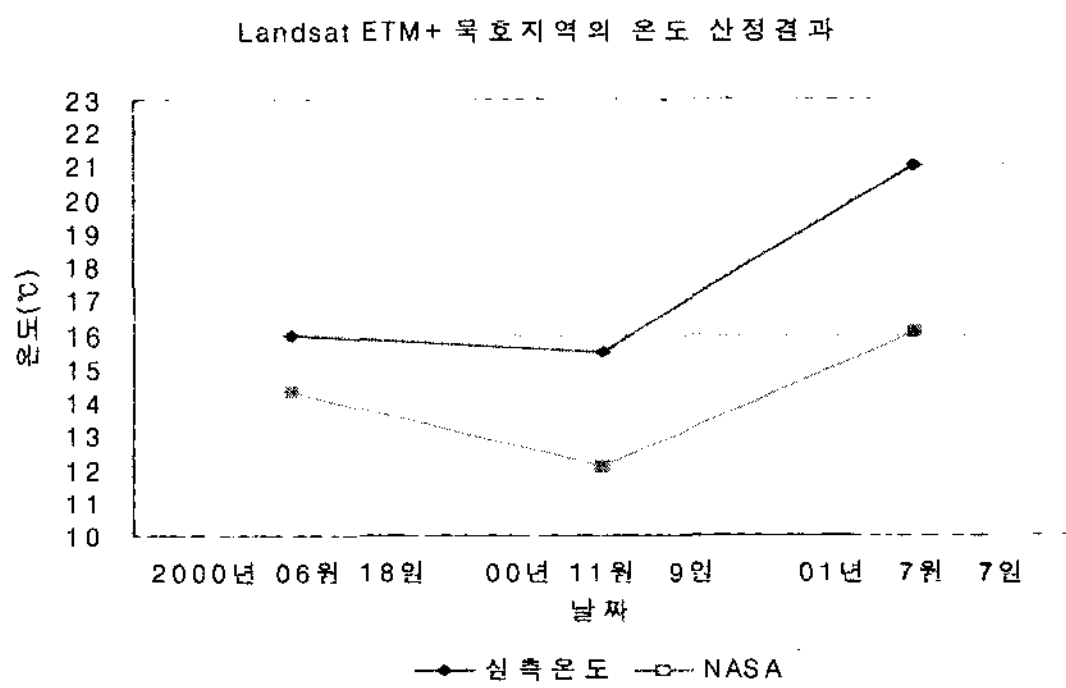


그림 6. Landsat ETM+영상의 묵호지역 온도 산정결과

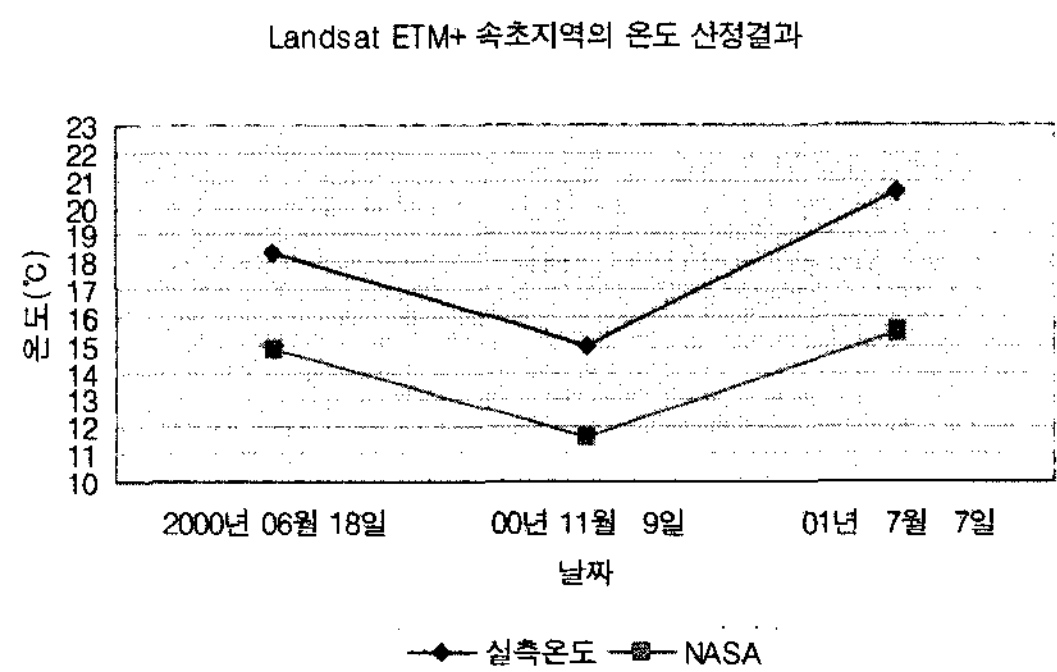


그림 7. Landsat ETM+영상의 속초지역 온도 산정결과

표 4. 대기 보정된 Landsat ETM+ 영상의 온도자료(°C)

지역	날짜	실측온도	NASA	±오차
속초	2000년 06월 18일	18.3	17.5	0.8
	2000년 11월 9일	15.0	15.0	0.0
	2001년 7월 7일	20.6	20.0	0.6
묵호	2000년 06월 18일	16.0	16.9	0.9
	2000년 11월 9일	15.5	15.5	0.0
	2001년 7월 7일	21.0	20.5	0.5

표 5. 온배수 영향을 받는 지역(A지역)의 온도 산출결과(°C)

	최소	최대	범위 (최대-최소)	평균
1984년 12월 7일	12.5	13.3	0.8	12.9
2000년 6월 18일	19.8	24.3	4.5	23.0
2000년 11월 9일	16.4	20.5	4.1	19.3
2001년 7월 7일	21.2	24.9	3.7	24.0

표 6. 온배수 영향을 받는 않는 지역(B지역)의 온도 산출결과(°C)

	최소	최대	범위 (최대-최소)	평균
1984년 12월 7일	12.4	13.0	0.6	12.4
2000년 6월 18일	17.6	18.7	1.1	18.4
2000년 11월 9일	16.9	17.5	0.6	17.1
2001년 7월 7일	20.0	20.9	0.9	20.3



그림 8. 온배수지역과 비교지역의 추출지역

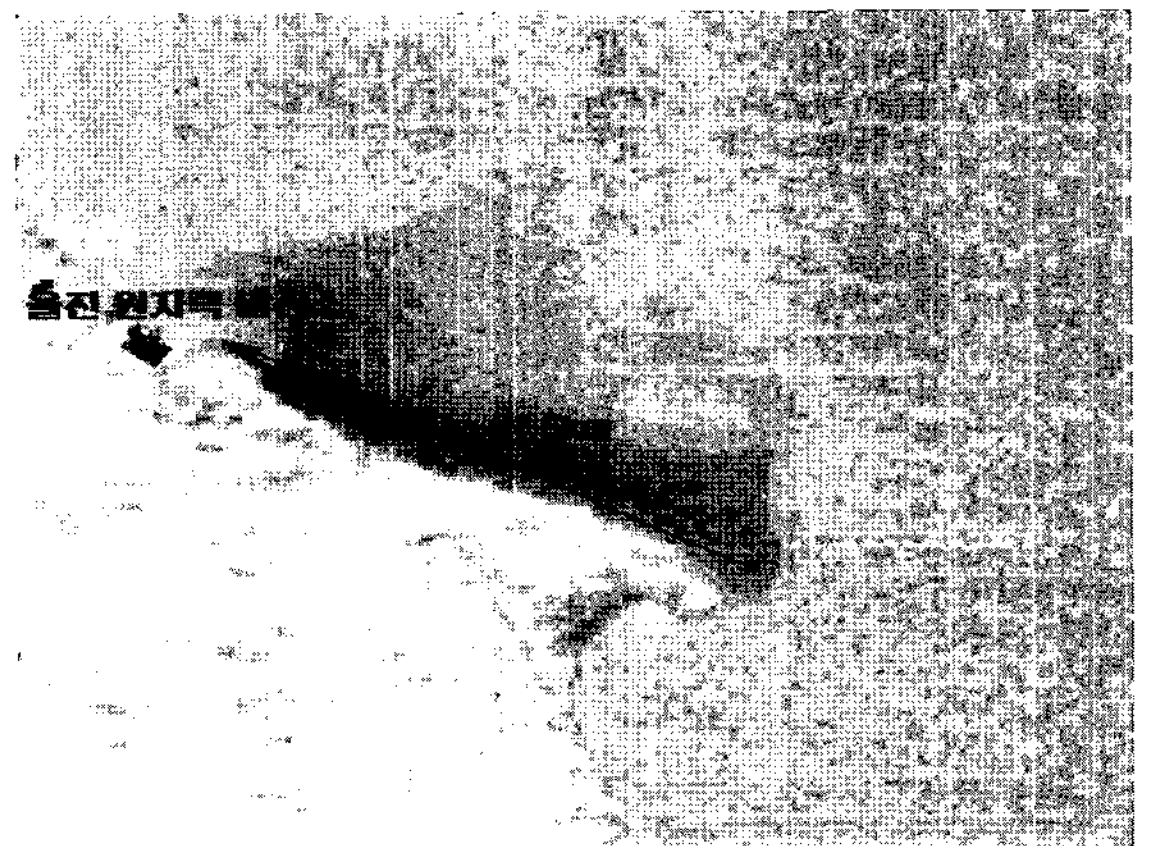


그림 9. 온배수가 퍼지는 양상

울진 원자력 발전소가 89년부터 가동되었다는 것에 대하여 주목하면, 84년과 다른 조사년도를 비교하였을 때 84년의 경우 A이나 B의 평균온도의 차이는 0.5°C로, 3km밖의 비교지역 온도나 발전소위치의 지역이나 온도 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 84년을 제외한 영상들을 보았을 때 두 지역이 멀지 않음에도 불구하고 동일 면적에 대하여 평균 3.5°C의 차이가 발생하였다는 것은 비교적 큰 차이라고 할 수 있다. 또한, 발전소 건립 후 A지역의 최대, 최소온도의 평균 차이는 약 4.1°C 인 반면 B지역의 최대, 최소온도의 평균 차이는 약 0.9°C 로서 울진 발전소 지역보다 비교지역의 평균온도 차이가 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것으로 보아 A지역은 원자력 발전소에서 배출하는 온배수의 영향을 많이 받고 있

는 지역이라고 할 수 있다. 온배수는 육지를 타고 남동쪽으로 퍼지고 있으며 3~5Km의 영역에 대하여 영향을 받고 있음이 확인되었다.

5. 결 론

Landsat ETM+영상의 온도자료를 실측온도와 비교해 볼 때 3.5°C 정도 차이가 발생하는 것으로 보아 대기보정이 되지 않은 Landsat ETM+ 영상의 온도자료를 온배수 분석과 같은 연구에 바로 적용하는 것은 무리가 있으며, Landsat ETM+영상의 온도자료는 대기보정이 필요한 것으로 판단된다. 자체의 데이터만으로는 대기보정을 수행할 수 없는 Landsat ETM+영상의 해수표면온도(SST) 산

출의 한계를 MODIS 영상을 이용하여 보정하였으며 그 결과 실측온도와와의 차이가 0.5°C로 좀 더 정확한 온도자료를 산출할 수 있었다.

84년~02년까지 울진원자력 발전소의 온배수에 대하여 분석해본 결과 발전소 인근지역은 온배수에 대하여 영향을 받고 있음이 검증되었으며 약 5km의 지역에 대하여 영향을 받는 것으로 나타났다. 온배수의 영향을 받는 지역의 수온은, 영향을 받지 않는 지역에 비해 평균 3.5°C 정도 높은 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 강릉대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음

참고문헌

김영섭(1998), 위성영상 대기보정을 위한 복사량 계산 보고서, 부경대학교 연구보고서.

오성남 (2004), 대기복사모형을 이용한 위성영상의 대기보정에 관한연구, 한국기상학회보, 14권2호, pp. 11~22.

이훈열, 한향선 (2005), Landsat 시계열 영상을 이용한 한강 수계 호수 수온과 계절적 성층현상 분석, 대한원격탐사학회지, 21권4호, pp. 253~271.

정주용, 안명환, 손은하, 서애숙 (2002), Terra/MODIS 해수면온도 산출 및 검증, 한국기상학회보, 12권3호, pp. 596~599.

최승필, 양인태 (1997), Landsat TM 영상에 의한 원자력 발전소로부터의 온배수 확산의 추적조사, 한국측량학회지 15권2호, pp. 231~236.

Honjo, T., Ueda, H., Nagatani, Y., Lim, E. and K. Umeki (2005), Analysis of Surface Temperature in Urban Green Spaces by Using Landsat TM and ETM+ Ddata, The 11th CERES International Symposium on Remote Sensing.

Otis B. Brown, Peater J. Minnet (1999), MODIS Infrared Sea Surface Temperature Algorithm, Algorithm Theoretical Basis Document Version, University of Miami.

Trisakti, B., Sulma, S. and S. Budhiman (2004), Study of Sea Surface Temperature (SST) using Landsat-7 ETM (In Comparison with Sea Surface Temperature of NOAA-12 AVHRR), The Thirteenth Workshop of OMISAR Project in Bali Indonesia, pp. 181-185.

(접수일 2008. 4. 1, 심사일 2008. 4. 12, 심사완료일 2008. 4. 28)