

Landsat TM을 이용한 표층수온 분석 오차

정종철 · 유신재

한국해양연구소

The Analysis Errors of Surface Water Temperature Using Landsat TM

Jong-Chul Jeong and Sin-Jae Yoo

Korea Ocean Research and Development Institute

Abstract : The estimation technique of surface water temperature by satellite remote sensing has been applied to ocean and large lakes using AVHRR. However, the spatial resolution of AVHRR is not adequate for coastal region and small lakes. Landsat 5 TM has 120 m spatial resolution, which suits better.

We carried out analysis of surface water temperature in Lake Sihwa and near coastal area using Landsat 5 TM. To relate digital number to the brightness temperature, we applied Empirical, NASA, RESTEC, Quadratic methods. Comparing calculated and observed value, we obtained as follows;

NASA method, $R^2 = 0.9343$, RMSE (Root Mean Square Error) = 3.5876°C ; RESTEC method, $R^2 = 0.8937$, RMSE = 3.76°C ; Quadratic method, $R^2 = 0.8967$, RMSE = 2.949°C .

Because Landsat TM has only one band for extracting surface temperature, it was difficult to correct for the atmospheric errors. For improving the accuracy of surface temperature detection using Landsat TM, there is a need for a method to decrease the effect of atmospheric contents.

Key Words : Surface temperature, Landsat TM

요약 : 위성자료를 이용한 표층수온 분포에 관한 연구는 AVHRR을 이용하여 해양이나 내륙의 거대 호수에 적용되어 왔다. 하지만, AVHRR은 공간적인 해상력이 낮아 (1.1 Km) 연안해역이나 시화호에 AVHRR을 적용하여 표층수온을 분석하기는 어렵다. 반면에 Landsat TM은 6번 밴드 (10.4-12.5 μm)를 이용하여 표층수온을 추출할 수 있으며, 120m의 공간해상력을 가지고 있어서 시화호와 인근 해역의 표층수온 분포를 분석하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 Landsat TM의 공간해상력이 가지는 장점을 이용하여 연안해역과 시화호의 표층수온을 분석하였다. 또한, 표층수온을 파악하기 위해 영상에서 얻은 신호에 경험적 방법, NASA, RESTEC, Quadratic 방법을 적용하여 휘도온도(Brightness Temperature; $^\circ\text{C}$)를 구하고 이들을 실측치와 비교하였다.

각각의 방법을 적용하여 얻은 계산치는 실측치 보다 $1-5^\circ\text{C}$ 낮게 나타났으며, NASA방법은 $R^2=0.9343$, RMSE= 3.5876°C , RESTEC방법은 $R^2=0.8937$, RMSE= 3.76°C , Quadratic방법은 $R^2=0.8967$, RMSE= 2.949°C 의 결과를 보여주었다.

Landsat TM은 단일밴드에 의해 표층수온을 추출하므로 대기중의 수증기에 따른 오차를 보정하기 어렵다. 따라서, TM 자료에 의한 표층수온 분포는 실측치보다 낮게 추정될 수 있다. 하지만, 연안해양과 시화호의 표층수온 분석에 있어서 공간해상력이 가지는 장점을 이용하기 위해서는 대기중의 수증기와 에어로졸에 의한 대기영향을 감소시킬 수 있는 방법이 제시되어야 할 것이다.

주요어 : 표층수온, Landsat TM.

I. 서론

위성영상을 이용한 표층수온 분포 분석에 관한 연구는 AVHRR을 이용하여 광범위한 지역의 해수면이나 내륙의 거대 호수에 적용되어 왔다. (Malm and Jonsson, 1993; Huh and Sim, 1987) 또한, 비행기 탑재센서에 의해 육상이나 호수에도 적용되어 지표온도와 수온을 비교 평가한 연구가 있었다 (Schmugge, 1991). 하지만, AVHRR은 4번 밴드(10.3 - 11.3 μm)와 5번 밴드(11.5 - 12.5 μm)를 이용하는 MCSST(Multi Channel Sea Surface Temperature)방법에 의해 대기중의 수증기 효과를 보정하여 비교적 정확한 계산이 가능하지만(Barton, 1995), 1.1 Km의 공간해상력으로 인해 연안해양과 시화호와 같은 호수의 표층수온을 분석하기에는 부적합하다.

따라서, 연안해양과 시화호(호수면적 56 km²)와 같은 공간적 범위의 표층수온 분석을 위해서는 120 m의 공간해상력을 가지는 Landsat TM의 적용이 고려될 수 있다. 하지만, Landsat TM은 공간해상력에서 고해상도의 장점에도 불구하고 열적외선 대에 단 하나의 밴드를 가지고 있어서 대기의 영향을 제거하기 어려운 문제가 있다. 이러한 대기 효과의 오차 때문에 TM에 의한 연안해양과 내륙 호수의 표층수온 분포 연구는 미약한 실정이다.

TM은 단일밴드에 의한 수온검출방법이 적용되고 있고, AVHRR은 두 개의 밴드를 적용하고 있다. 동일지점 관측주기에 있어서 AVHRR은 하루 2 회 이상 위성영상을 획득할 수 있으나, TM은 16일을 주기로 운행되며 대기중의 구름에 의한 영향으로 분석 가능한 위성영상의 획득이 매우 어렵다. 이와 같이 TM과 AVHRR 센서는 상호 장단

점을 지니고 있으며, 적용하고자 하는 공간적인 범위와 목적에 의해 센서의 장점을 충분히 활용할 수 있는 위성자료의 선택이 중요한 문제가 될 것이다.

TM의 열적외선 밴드에 의한 해수면의 표층수온을 추출하기 위해서는 위성에서 얻어진 영상신호를 해수면의 휘도온도로 계산하여 줄 수 있는 계산식이 필요하다. 일반적으로 이러한 계산식은 경험적인 계산식으로 적용되고 있으며, 현장조사 자료에 의해 보정되거나 검증된 연구는 미약한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 TM을 이용하여 연안해양과 시화호의 표층수온 분포를 분석하는데 있어서 표층수온 검출방법에 대한 선행연구의 적용방법을 비교하고, TM의 열적외선 밴드를 이용한 표층수온 검출방법의 문제점과 적용에 대한 적합성을 평가하는데 본 연구의 목적이 있다.

II. 연구방법 및 범위

본 연구의 공간적인 범위는 1994년 방조제 공사가 완료된 이후 급격하게 오염되고 있는 시화호와 그 주변해양으로 하였다. 이러한 공간적인 범위의 설정은 연안해양과 시화호가 가지는 수리적 특성에 기인한다. 연안해양의 경우 조석의 영향을 받아 해수의 흐름이 일정한 주기로 일어나지만, 시화호의 경우 방조제로 막혀 있어서 체류시간이 길고, 수체의 흐름이 적은 특성을 갖기 때문이다.

시간적인 범위는 본 연구에서 분석에 이용한 TM 영상 중 구름의 영향이 적고, 현장조사와 일치하는 시점인 1997년 6월 16일로 하였다. 조사지역에서 표층수온의 측정은 25개 정점에서 실시하

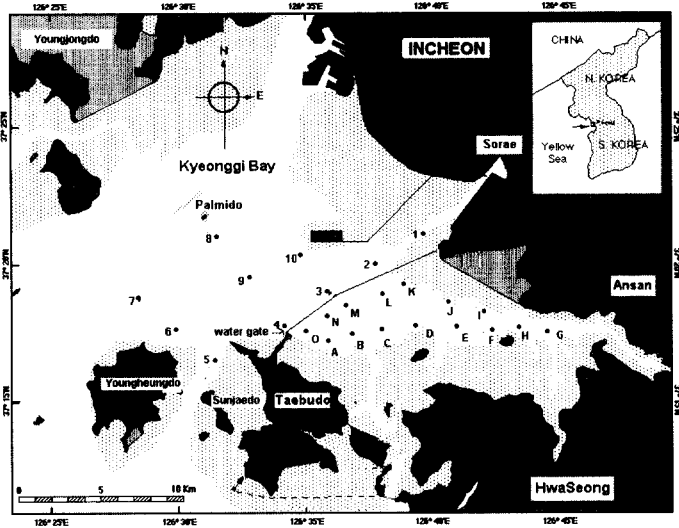


Fig. 1. Study area and sampling site

였으며, 시화호에서 세 개의 축선으로 15개 정점, 연안해역에서 세 개의 축선으로 10 정점에서 위성이 연구대상지역을 통과하는 AM 10시 30분을 전후하여 측정하였다. 조사지역과 조사정점을 그림 1에 제시하였다.

현장조사시 수온은 CTD(Conductivity Temperature Depth, SBE 25)를 이용하였으며, 수온의 수심별 분포를 비교하였다. 위성영상분석은 현장조사와 같은 시점의 Landsat 5 TM(path-row: 116-034, 태양고도 63°)을 획득하여 기하보정을 통하여 현장조사와 위성자료의 분석치 간에 비교가 가능하도록 현장조사 지점과 동일한 지점을 영상자료에서 찾아 영상신호(Digital Number와 Normalized Radiance)를 구하였다. 기하보정은 1:25000 지형도에서 GCP를 정하고 최근린법을 적용하였다. 가장 가까운 거리에 인접한 화소의 값을 택하는 최근린 방법은 원화상의 데이터를 변질시키지 않기 때문에 적합한 기하보정 방법으로 판단되었다. 또한, 조사정점의 위치를 파악하기 위해 GPS(TRAXAR, Motorola Co.)를 이용하였다.

본 연구에서는 위성자료에서 획득된 영상신호를 휘도온도로 추출하기 위해 선행연구에서 제시하고

있는 표층수온 검출방법을 NASA방법, RESTEC 방법, Quadratic방법으로 구분하고, 각각의 방법을 적용하여 해수면의 휘도온도를 현장조사 지점과 동일한 지점에서 추출하였다. 추출된 표층수온은 현장조사치와 비교하였으며, 각 방법에 의한 계산치와 실측치의 RMSE를 구하였다.

또한, TM과 동일시점의 AVHRR 자료에 의해 TM의 분석 오차를 해석하였다. AVHRR의 4번 밴드와 5번 밴드의 차이는 수증기의 효과가 반영된다. 따라서, TM에 의해 분석된 계산치와 실측치 오차를 AVHRR의 T4 - T5와 비교하여 TM 자료에 의해 계산된 계산치의 오차가 발생하는 원인을 해석하였다.

AVHRR 자료는 TM 자료와 같은 1997년 6월 16일의 자료를 이용하였고, 시화호와 황해 해역의 표층수온과 4번과 5번 밴드의 값을 계산하였다.

III. 표층수온 검출방법

위성영상에 의한 표층수온 분포 분석은 열적외선 측정에 의한 방법으로 적용된다. 태양의 복사

에너지는 주로 단파장에 분포하지만 지구에서 방출되는 열복사는 10 μm 부근에서 최대값을 가진다. 따라서, 10 - 12 μm 파장대를 관측하면 수면에서 방출되는 복사에너지를 측정할 수 있고, 이를 통해 수면의 온도를 추정할 수 있다.

하지만, 열적외선의 대기 투과는 대기중의 구성성분에 의해 영향을 받게 되는데, 10 - 12 μm 파장대에서 CO, CH₄, N₂O, O₃, CO₂에 의한 영향은 매우 작아 98 - 100 %의 투과성을 보이지만, H₂O는 10% 이상의 흡수를 보인다(Robinson, 1985). 이러한 대기효과는 파장대에 따라 차이가 나타나는데, 10.3 - 11.3 μm 영역 보다는 11.5 - 12.5 μm에서 수증기에 의한 영향이 더 크게 나타난다. 위성영상을 이용한 표층수온 검출방법은 이러한 파장에 따른 대기 투과도를 센서의 특성에 의해 구분하여 적용하고 있으며, AVHRR의 경우 4번 밴드(10.3 - 11.3 μm)와 5번 밴드(11.5 - 12.5 μm)를 이용하여 대기중의 수증기를 보정하는 방법을 적용하고 있다 [T=T₄ + a(T₄-T₅) + b](Barton, 1995).

또한, Landsat 5 TM은 6번 밴드를 이용하는데 10.4 - 12.5 μm의 파장대에서 얻어지는 복사량에 의해 표층수온을 추출한다. 때문에 TM의 경우 AVHRR과 같이 11.5 - 12.5 μm에서의 수증기 효과를 제거할 수 없는 단점을 지니고 있다. 하지만, TM이 지닌 공간해상력의 분석 특성으로 인해 표층수온을 검출하는 경험적 방법이 제시되어왔다.

본 연구에서는 표층수온 검출방법을 문헌조사를 통해 선행연구의 결과를 비교하고, 다음의 세 가지로 구분하였다. 또한, 이들 각각의 방법을 통해 Landsat TM에서 수신된 영상신호를 휘도온도로 계산하였다.

1. NASA 방법

Markham and Baker(1986)는 Landsat TM의 열적외선 밴드를 이용한 지표온도와 표층수온을 검출하기 위해 현장에서 실측된 수온과 위성에서 수신된 영상자료의 분석에 의한 휘도온도 사이의 관계를 통해 다음 식(1)을 제시하였다. 이 계산식을

통해 절대온도(K)를 얻을 수 있으며, 계산식에는 태양고도에 의해 보정된 Normalized Radiance 값과 열적외선 보정계수 K₁, K₂가 사용되었다.

$$T = \frac{K_2}{\ln [(K_1 / L_\lambda) + 1]} \quad (1)$$

T = Effective at-satellite temperatures in Kelvin, K
 K₂ = Calibration constant 2 in K from Table 1
 K₁ = Calibration constant 1 in mW cm⁻²ster⁻¹μm⁻¹
 Lλ = Spectral radiance in mW cm⁻²ster⁻¹μm⁻¹

Table 1. Landsat TM thermal band calibration constant

Satellite	constant 1 K ₁ (K)	constant 2 K ₂ mW/(cm ² sterμm)
Landsat - 4	67.162	1284.3
Landsat - 5	60.776	1260.56

여기서 본 연구에 적용된 Landsat 5 TM의 열적외선 밴드 보정계수는 표 1과 같이 적용하여 취득된 TM영상자료로부터 절대온도를 얻을 수 있으며, Markham and Baker(1986)는 TM의 Solar Exoatmospheric Spectral Irradiances값에 의해 Spectral radiance를 구하였다.

2. RESTEC(Remote Sensing Technology Center of Japan) 방법

RESTEC은 TM 밴드 6, 즉 열적외선 밴드와 휘도온도(Brightness Temperature) 사이에 식(2)를 적용하고 있다.

$$R = 5.1292 \times 10^{-5} T^2 - 1.7651 \times 10^{-2} T + 1.6023 \quad (2)$$

여기서, R은 TM에 의해 기록된 광량(Normalized Radiance)이다.

3. Quadratic 방법

Lathrop and Lillesand(1987)는 미시간 호수를 대상으로 하여 표층수온을 추출하는데 있어서 Quadratic 방법을 적용하여 실측치(°C) = 1.916 + 0.8789 * 계산치(°C)의 관계식을 통해 R²=0.977을 얻었다. Quadratic 방법은 현장의 실측치와 Landsat TM의 DN값에 의한 경험식으로 다음 식

(3)과 같다. 본 연구에서도 TM의 DN값을 추출하여 현장의 실측치와 비교하였으며, DN 값에 의한 실측치 관계식을 그림 2에 제시하였다.

$$\text{Temp(K)} = 209.831 + 0.834 \text{ DN} - 0.00133 \text{ DN}^2 \quad (3)$$

IV. 결과 및 고찰

표층수온 검출방법으로 제시한 각각의 계산식에 의해 얻어진 결과를 현장조사 자료와 비교한 결과는 다음과 같다. 그림 2는 TM에 수신된 Digital Number를 실측치와 비교한 것이고, 그림 3은 Normalized Radiance와 실측치를 비교한 것이다. Digital Number와 실측치는 $R^2 = 0.9152$ 를 나타내고 있으며, Normalized Radiance와 실측치는 $R^2 = 0.895$ 를 나타냈다.

그림 4와 5는 NASA방법과 RESTEC방법으로 계산된 휘도온도와 실측치를 비교한 것이다. NASA방법에 의한 결과는($R^2 = 0.9343$) RESTEC방법($R^2 = 0.8937$) 보다 실측치와 계산치 사이의 상관관계가 높게 나타났으나, 계산치를 통해서 얻고자 하는 일대일대응선으로 비교할 때 NASA는 0.4966의 기울기를 나타냈고, RESTEC방법은 0.5471의 기울기를 나타냈다. 그림 6은 식(3)의 Quadratic 방법을 적용하여 조사지역의 실측수온과 계산치 수온을 비교한 결과이고, $R^2 = 0.8967$ 을 나타내고 있다.

앞에서 살펴본 바와 같이 표층수온 검출방법 세 가지에 의한 상관계수는 NASA방법이 $R^2 =$

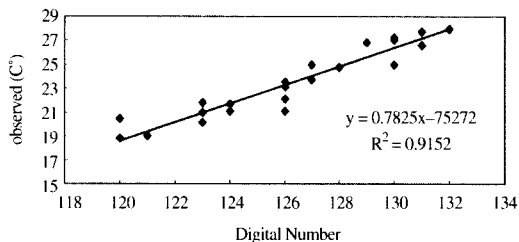


Fig. 2. Plot of the observed temperature and Digital Number

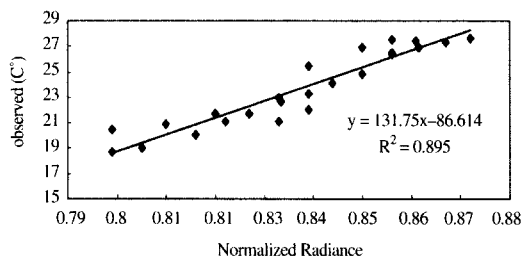


Fig. 3. Plot of the observed temperature and normalized radiance

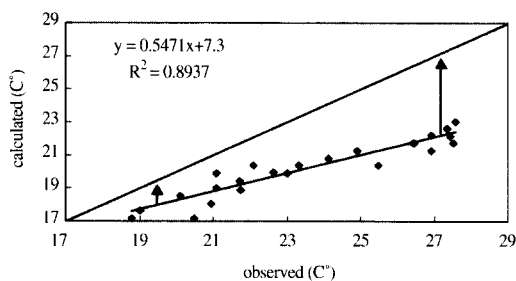


Fig. 4. Plot of observed temperature and calculated temperature using the NASA method

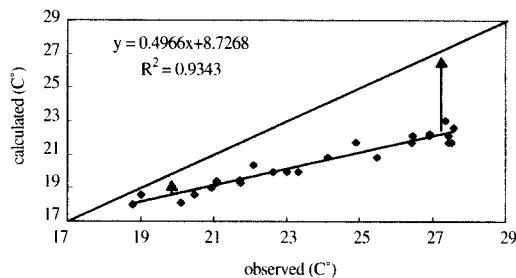


Fig. 5. Plot of observed temperature and calculated temperature using the RESTEC method

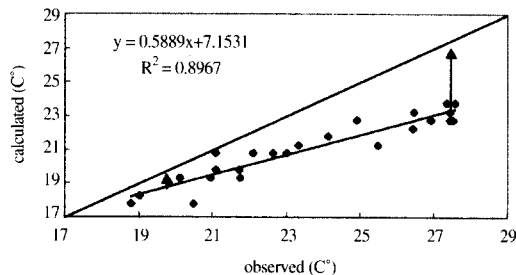


Fig. 6. Plot of observed temperature and calculated temperature using the Quadratic method

0.9343으로 가장 높다. 하지만 실측치에 대한 계산치의 기울기는 Quadratic방법이 0.5889로 다른 두 방법에 비해 큰 값을 보여주고 있으며, RMSE가 2.949°C로서 NASA방법 3.5876°C, RESTEC방법 3.76°C 보다 실측치에 대해 적은 오차를 보여주었다. NASA방법은 post calibration에 의한 방법으로 계산치와 실측치 사이에는 높은 상관관을 보여주지만, RMSE가 큰 반면에 Quadratic방법은 보다 실측치에 근사한 값을 나타내고 있다.

하지만, 실측치와 계산치의 기울기가 그림 3, 4, 5에서 제시된 화살표와 같이 수온에 비례하여 크게 오차를 나타내고 있다. 이는 표 2에 제시한 대기중의 수증기에 의한 감소치로 파악된다. Stewart (1985)는 대기중의 수증기에 의해 해수면 표층수온은 1 - 8 K의 오차 범위를 가지고 있으나, 에어로졸이나 다른 가스는 0.1 - 2 K의 오차 범위를 가지기 때문에 수증기에 의한 오차가 가장 크게 영향을 미치는 것으로 보고하였다.

본 연구에서는 표층수온 추정 오차에 대한 수증기와 에어로졸의 효과를 구분하기 위해 다음의 방법을 적용하였다. AVHRR의 경우 Barton(1995)이 제시한 바와 같이 4번 밴드(T4)와 수증기에 의한 영향을 잘 반영하는 5번 밴드(T5)를 이용하여 대기중의 수증기 효과를 파악할 수 있다. AVHRR 자료에서 얻어진 T4 - T5는 수증기 밀도에 비례하여 증가한다(Stewart, 1985). 실측 수온과 TM 자료에 의해 얻어진 계산치의 오차와 T4 - T5가 양의 상관관계를 가질 경우 TM에 의

Table 2. Relative importance of the atmosphere on radiometric observation of sea-surface temperature in terms of error (Stewart, 1985)

10.5μm Band	
undetected cloud	0 - 10 K
water vapor	1 - 8 K
aerosols	0.1 - 2 K
reflected sky	0.2 - 0.7 K
other gases	0.1 K

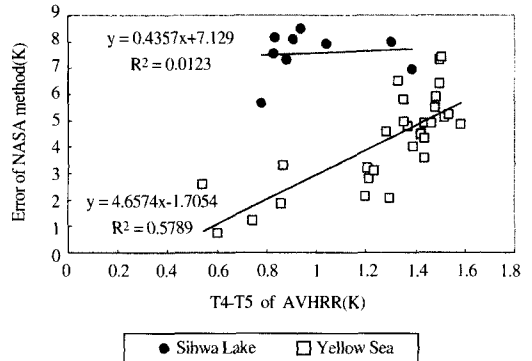


Fig. 7. Relationship between the calculated error of TM and T4-T5 of AVHRR

한 분석오차는 대기중의 수증기에 의한 효과임을 알 수 있다. 반대로, 실측치와 TM에 의한 계산치의 오차와 T4 - T5가 상관관계가 없다면, 에어로졸의 영향이 표층수온 분석 오차를 유발했다고 할 수 있다.

그림 7은 시화호와 황해 연안해역의 T4 - T5와 실측치와 TM에 의해 얻어진 계산치의 오차를 비교한 것이다. 시화호는 표층수온 실측치와 TM에 의한 계산치의 오차와 AVHRR의 T4 - T5가 $R^2=0.0123$ 의 낮은 상관관계를 가지고 있다. 이는 시화공단에서 배출되는 대기오염물질의 영향이 시화호의 표층수온을 분석하는데 오차를 일으키는 것으로 판단된다.

시화호 외해역은 AVHRR의 T4 - T5와 TM의 오차가 결정계수 $R^2=0.5789$ 를 나타내고 있어서 TM의 표층수온 분석 오차가 수증기에 의한 오차로 판단되었다.

그림 8은 Landsat TM 자료에 NASA 방법을 적용하여 시화호와 연안해역의 표층수온 분포를 나타낸 것이다. 시화호의 표층수온 분포 경향은 연안해역에 비해 높은 수온분포를 나타내고 있으며, 배수갑문을 중심으로 시화호의 표층수온 분포 경향이 명확히 구분되어 나타나고 있다. 시화호는 22.5 - 27.5(°C)의 표층수온분포를 나타내고 있으며, 시화호 외해의 연안해역은 18 - 22.4(°C)의 표층수온분포를 나타내고 있다.

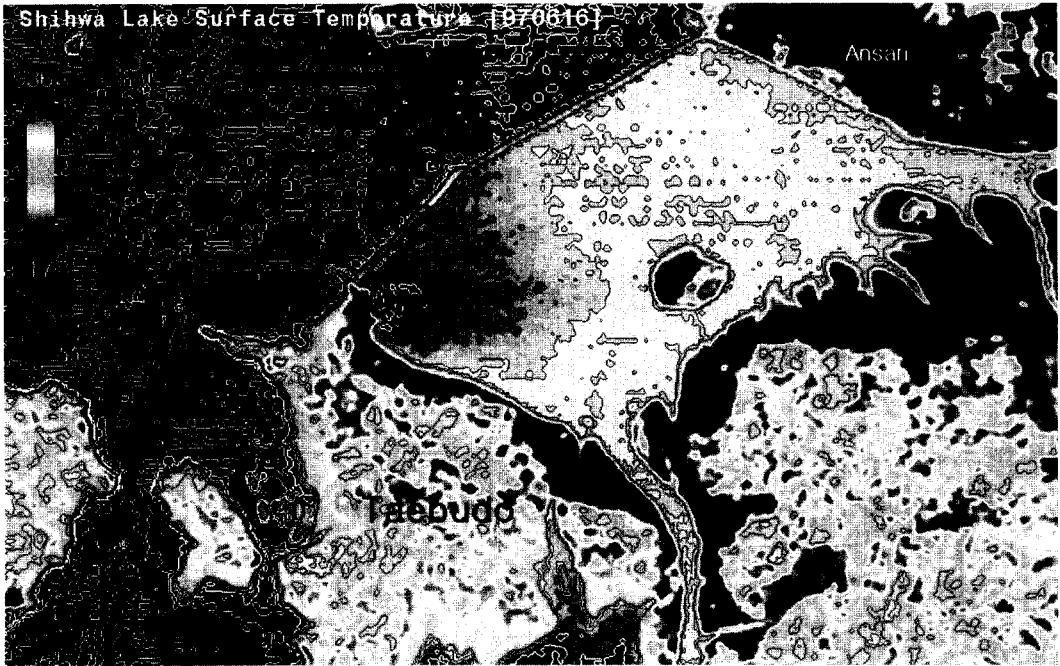


Fig. 8. Map of the surface temperature

V. 결론

본 연구는 발전소 온배수에 의한 연안해역의 온배수 피해범위를 산정하거나, 공단에서 배출되는 열폐수의 유출경로 및 영향 등의 조사에서 Landsat TM을 이용할 경우 나타나는 오차를 검증하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 방안을 도출하기 위한 기초연구이다.

시화호와 연안해역의 표층수온 분포분석 결과를 제시한 본 연구의 결과로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

첫째, 분석된 위성자료가 현장조사에 의한 검증이 이루어지지 않을 경우, 영상신호에 의한 표층수온 추출은 대기효과의 영향으로 실측치 보다 낮게 평가 될 수 있다. 이는 위성에서 얻어지는 표층수온은 0.2 mm이하 두께의 표층에 불과하므로 실측 수온 보다 높게 나타날 것으로 판단되는 것과 반대의 결과를 나타낸다. 즉, 위성자료의 계산치가 실측치보다 낮은 것은 대기중의 수증기와 에어

로졸에 의한 계산치의 오차가 반영되기 때문이다.

둘째, DN을 이용한 경험식이 본 연구에서 적용한 방법 중 가장 작은 RMSE(2.949°C)를 나타내어 실측치와 DN에 의한 경험식의 적용이 보다 작은 오차범위에서 표층수온을 계산해 낼 수 있다.

셋째, 현장실측치와 위성분석치 간의 오차는 수온에 비례하여 오차가 증가한다. 시화호는 정체된 호수이고, 연안해역은 조석의 영향이 표층수온 실측치에 반영되어 연안해역의 계산치가 더 큰 오차를 나타낼 것으로 판단되었으나, 본 연구결과 조석의 영향보다는 대기효과의 영향이 더 크게 나타나는 것으로 판단되었다.

Landsat TM으로 표층수온 분포를 분석하기 위해서 구름은 밴드 1, 2, 3에서 구분하여 열적외선 밴드에서 제거가 가능하지만 열적외선 밴드에서의 대기효과(에어로졸, 수증기) 제거에 대한 연구는 미약한 실정이다. 따라서, 표층수온을 Landsat TM을 이용하여 보다 정확히 파악할 수 있는 방법을 제시하기 위해서는 먼저 실측치에 의한 일대

일 대응선으로 계산치를 일치시키는 계산식이 제시되어야 한다. 또한, 대기중의 에어로졸과 수증기의 영향을 최소화시키기 위해 열적외선 밴드에서의 대기효과에 의한 영향을 제거해야 하며, 이로써 연안해역에서의 표층수온 분포를 파악하는데 따른 측정오차를 줄일 수 있을 것이다.

참고문헌

- Barton, I. J., 1995, Satellite-derived sea surface temperatures: Current status, *J. Geograph. Rese.*, Vol. 100, No. C5, 8777-8790.
- Huh, O. K., and T. Sim, 1987, Satellite observation of surface temperatures and flow patterns, Sea of Japan and East China sea, late march 1979, *Remote Sens. Environ.*, 22:379-393.
- Lathrop, R. G., and T. M. Lillesand, 1987, Calibration of thematic mapper thermal data for water surface temperature mapping: case study on the great lakes, *Remote Sens. Environ.*, 22:297-307.
- Malm, J., and L. Jonsson, 1993, A study of the Thermal Bar in Lake Ladoga Using water surface temperature data from satellite images, *Remote Sens. Environ.*, 44:35-46.
- Markham, B. L., and J. L. Baker, 1986, Landsat MSS and TM post calibration dynamic ranges, Exoatmospheric Reflectances and At-satellite Temperature, *EOSAT Landsat Technical Notes*, 1:1-8.
- Robinson, I. S., 1985, *Satellite Oceanography: an introduction for oceanographers and remote sensing scientists*(Chichester: Ellis Horwood Limited)
- Schmugge, T. J., 1991, Spectral emissivity variances observed in airborne surface temperature measurements, *Remote Sens. Environ.*, 35:95-104.
- Stewart, R., 1985, *Methods of satellite oceanography*, Univ. of california press, pp.134-135.
- Wukelic, G. E., Gibbons, D. E., Martucci, L. M., and Foote, H. P., 1989, Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper thermal band, *Remote Sens. Environ.*, 28:339-347.