

Landsat 시계열 영상을 이용한 한강 수계 호수 수온과 계절적 성층 현상 분석

이훈열[†] · 한향선

강원대학교 지구물리학과

Analysis of Lake Water Temperature and Seasonal Stratification in the Han River System from Time-Series of Landsat Images

Hoonyol Lee[†] and Hyangsun Han

Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract : We have analyzed surface water temperature and seasonal stratification of lakes in the Han river system using time-series Landsat images and *in situ* measurement data. Using NASA equation, at-satellite temperature is derived from 29 Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ images obtained from 1994 to 2004, and was compared with *in situ* surface temperature on river-type dam lakes such as Paro, Chuncheon, Euiam, Chongpyong, Paldang, and with 10m-depth temperature on lake-type dam lake Soyang. Although the *in situ* temperature at the time of satellite data acquisition was interpolated from monthly measurements, the number of images with standard deviation of temperature difference (at-satellite temperature - *in situ* interpolated temperature) less than 2°C was 24 on which a novel statistical atmospheric correction could be applied. The correlation coefficient at Lake Soyang was 0.915 (0.950 after correction) and 0.951-0.980 (0.979-0.997 after correction) at other lakes. This high correlation implies that there exist a mixed layer in the shallow river-like dam lakes due to physical mixing from continuous influx and efflux, and the daily and hourly temperature change is not fluctuating. At Lake Soyang, an anomalous temperature difference was observed from April to July where at-satellite temperature is 3-5°C higher than *in situ* interpolated temperature. Located in the uppermost part of the Han river system and its influx is governed only by natural precipitation, Lake Soyang develops stratification during this time with rising sun elevation and no physical mixture from influx in this relatively dry season of the year.

Key Words : Landsat, at-satellite temperature, *in situ* interpolated temperature, stratification, lake-type dam lake, river-type dam lake.

요약 : Landsat 시계열 영상과 실측수온자료를 이용하여 한강 수계 댐호들의 표면수온과 계절적 성층현상을 분석하였다. 1994년에서 2004년까지 29회에 걸쳐 얻어진 Landsat-5, 7 열적외선 영상으로부터 NASA 경험식을 이용하여 호수의 표면수온을 추출하였고, 이를 하천형 댐호인 파로호, 춘천호, 의암호, 청평호, 팔당호의 표층수온, 그리고 호소형 댐호인 소양호의 상층수온(수심 10m) 자료와 비교하였다. 십 수 년

2005년 4월 19일 접수 ; 2005년 8월 9일 수리.

[†] 교신저자: 이훈열(hoonyol@kangwon.ac.kr)

간 매월 1회 측정된 수온자료를 위성관측 날짜에 보간하여 사용하였음에도 불구하고, 하천형 댐호들에서는 수온오차(위성관측수온-실측보간수온)의 표준 편차가 2°C 이하인 영상이 24개로서, 새로운 통계적 대기보정을 적용할 수 있었다. 실측보간수온과 위성관측수온의 상관계수는 소양호가 0.915 (대기보정 후 0.950), 다른 호수는 0.951-0.980 (대기보정 후 0.979-0.997)로서, 높은 상관성을 보여주었다. 이는 수심이 얇고 인위적인 물의 유입과 유출이 연중 계속되는 하천형 댐호의 표층에는 혼합층이 상시 존재하고 수온의 일변화 및 월변화가 비교적 연속적이기 때문인 것으로 해석되었다. 그러나 소양호에서는 4-7월에 위성관측수온이 실측보간수온보다 3-5°C 더 높게 나타나는 이상 수온오차가 관찰되었다. 한강 수계의 최상류에 위치하며 수심이 깊고 자연적인 유입량만이 존재하는 소양호에서 이 시기는 상층수의 물리적 혼합현상이 없이 매우 안정적이고, 일조량 증가에 따라 호수 상층부에 수온약층이 발달하기 때문에, 수심 10m에서 측정된 실측수온보다 위성으로 관측된 표면수온이 연중 비교적 건조한 이 시기에 더 높게 나타나는 것으로 밝혀졌다.

1. 서론

지표에서 반사되거나 방사되어 인공위성 센서에 감지되는 전자기파 중에는 태양 복사 에너지와 지구 복사 에너지가 동시에 존재하게 된다. 이 중에서 지구 복사 에너지를 인공위성 센서가 감지할 수 있다면 지구 표면온도의 정확한 측정이 가능하다. 그러나 낮에는 육지의 대부분이 지구 복사 에너지를 방출함과 동시에 태양 복사 에너지도 반사하기 때문에 정확한 표면온도 측정이 불가능하다. 그러나 강이나 호수, 바다 등 액체상태의 물은 열적외선 파장에서 흑체에 가까운 성질을 나타낸다. 즉, 물은 입사하는 열적외선 영역의 태양 복사 에너지를 모두 흡수하고 지구 복사 에너지를 전부 방출한다. 따라서 물의 온도를 관측하는데 있어서 주간에 촬영된 인공위성의 열적외선 센서가 매우 유용하게 이용되고 있다.

Landsat 열적외선 영상은 규모가 크지 않은 내륙의 하천 및 호수의 표면온도 분석에 용이한 공간적인 해상력을 가지고 있다. 특히 비교적 오랜 기간 동안의 영상이 축적되어 있기 때문에 시계열 및 계절적 분석이 가능하다. 이 논문에서는 Landsat 시계열 열적외선 영상을 이용하여 한강 수계 호수들에 대한 표면수온을 산출하였고, 이를 현장 실측수온과 비교하였으며, 통계적인 방법으로 대기보정을 수행하였다. 그리고 한강 수계 최상류에 위치한 소양호에서 위성관측수온이 실측수온보다 높게 나타나는 이상 현상의 관측을 통해, 하천형 댐호와 호수형 댐호의 차이를 고찰하고 계절에 따른 호수의 혼합층 및 수온약층을 포함한 성층 현상을 검증하였다.

2. 연구지역 및 자료

이 논문의 연구지역은 한강 수계에서 인공 댐의 건설로 형성된 호수들로서, 수계의 최상류인 춘천지역의 소양호(소양강댐)와 파로호(화천댐)로부터 하류로 내려가면서, 춘천호(춘천댐), 의암호(의암댐), 청평호(청평댐), 그리고 수계 최하류 댐호인 팔당호(팔당댐)까지 모두 6개의 호수이다(Fig. 1). 소양호는 높이 123m의 소양강 댐으로 이루어진 국내 최대 규모의 호수형 댐호이며, 다른 댐들은 하천형 댐호에 해당한다(Table 1).

여섯 개 호수에 대한 실측수온은 소양호 1개, 화천호 3개, 춘천호 3개, 의암호 3개, 청평호 3개, 팔당호 5개 지점의 총 18개 지점(Fig. 2)에서 1992년부터 2004년까지

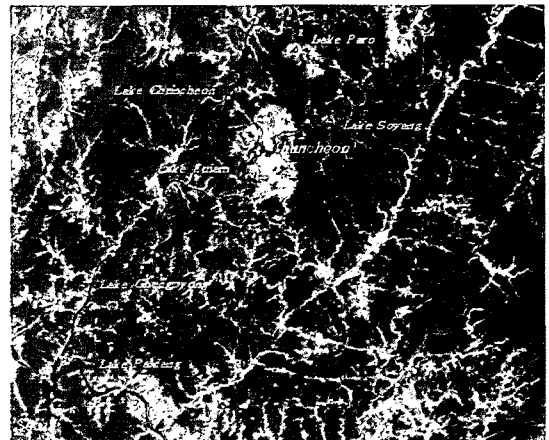


Fig 1. Location map of the study area. Red dots are the locations of *in situ* water temperature measurement overlying the Landsat-7 image, acquired on 28 April 2002, displayed bands 3, 2, 1 in RGB. (80km × 70km)

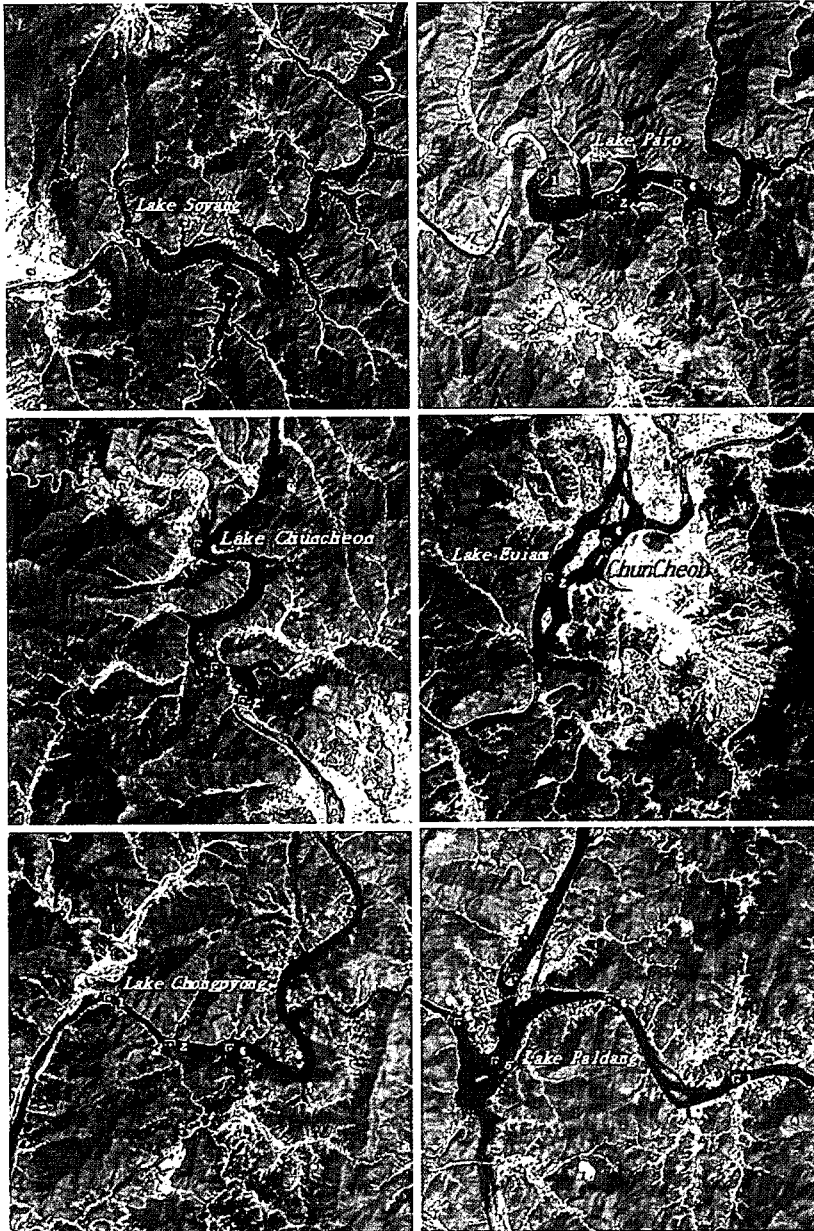


Fig 2. Detailed Locations of *in situ*(red dots) and satellite(white boxes) temperature measurement on each lake. All images are at the same scale.

Table 1. Characteristics of the dams and lakes in the Han river system.

The average water depth is the value measured in front of each dam.

Dam	Dam Height (m)	Dam Altitude (m)	Average Water Depth (m)	Dam	Dam Height (m)	Dam Altitude (m)	Average Water Depth (m)
Soyang Dam	123.0	203.0	70.0	Euian Dam	23.0	77.0	12.3
Hwacheon Dam	81.5	184.5	54.3	Chongpyong Dam	31.0	53.0	24.0
Chuncheon Dam	40.0	107.0	31.0	Paldang Dam	29.0	32.0	22.0

월 1회 측정된 것이며, 일부 측정지점은 2004년부터 주 1회 측정이 이루어지고 있다. 실측수온의 측정 깊이는 소양호를 제외한 하천형 댐호에서 공식적으로는 0~5m에서 이루어진 것으로 되어 있으나, 실제 수온 측정은 보통 수심 30cm 내에서 이루어지는 것으로 환경부 수질정책과는 밝히고 있어, 표층수온을 측정한 것으로 간주할 수 있다. 소양호에서는 2003년까지는 수심 10m에서 상층수온이 측정되어 왔으며, 2004년부터는 수심 5m에서 측정하고 있다. 또한 2001년부터 2004년까지 소양강댐 앞에서 측정된 수심 5m 별 수온자료도 성층현상 분석에 이용되었다. 이 모든 자료에 대한 관측 장소와 날짜는 기록되어 있으나, 관측 시간에 대한 기록은 없다.

연구에 사용된 Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ 영상은 1994년부터 2004년까지, 서울, 경기 지역을 포함하는 PATH-ROW 116-034 영상 17개와 강원도 지역을 포함하는 PATH-ROW 115-034의 영상 12개로, 총 29개의 영상이다(Table 2). 실측수온을 측정한 호수들이 대부분 116-034와 115-034 영상에서 겹쳐지기 때문에 시계열적으로 많은 위성 데이터를 얻을 수 있었다. 소양호 상부에는 세 개의 실측 지점이 더 있으나, 영상이 겹치지 않는 관계로 분석에서 제외하였다.

3. Landsat 위성관측수온 산출

본 연구에서 사용된 Landsat-5 TM과 Landsat-7 ETM+의 열적외선 영상에서 얻어지는 DN 값은 주어진 수식에 따라 방사휘도(Radiance) 값으로 변환되며, 다시 경험식에 의하여 온도로 전환된다. 먼저, Landsat 열적외선 영상의 DN 값은 다음 수식에 의해 방사휘도 L_λ 로 변환된다(Chander and Markham, 2003).

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

L_λ = spectral radiance at the sensor aperture in watts/(meter squared*ster* μ m)

QCAL = the quantized calibrated pixel value in DN

$LMIN_\lambda$ = the spectral radiance that is scaled to QCALMIN in watts/(meter squared*ster* μ m)

$LMAX_\lambda$ = the spectral radiance that is scaled to QCALMAX in watts/(meter squared*ster* μ m)

QCALMIN = the minimum quantized calibrated pixel value (corresponding to $LMIN_\lambda$) in DN

= 1 (LPGS Products)

= 0 (NLAPS Products)

QCALMAX = the maximum quantized calibrated pixel value (corresponding to $LMAX_\lambda$) in DN = 255

Table 3과 4는 각각 Landsat-5 TM과 Landsat-7 ETM+의 Spectral Radiance Range이다. 방사휘도를 온도로 전환시켜 주는 방법에는 NASA 경험식과

Table 2. Landsat images used in this study.

Satellite	Date	PATH	ROW	Satellite	Date	PATH	ROW
Landsat5 TM	1994/06/16	115	34	Landsat7 ETM+	2002/02/14	116	34
Landsat5 TM	1994/07/26	116	34	Landsat7 ETM+	2002/03/11	115	34
Landsat5 TM	1997/06/16	116	34	Landsat7 ETM+	2002/04/28	115	34
Landsat5 TM	1997/12/25	116	34	Landsat7 ETM+	2004/01/03	116	34
Landsat5 TM	1998/10/02	115	34	Landsat7 ETM+	2004/02/04	116	34
Landsat5 TM	1999/03/02	116	34	Landsat7 ETM+	2004/02/20	116	34
Landsat5 TM	1999/05/21	116	34	Landsat7 ETM+	2004/02/29	115	34
Landsat7 ETM+	1999/06/30	116	34	Landsat7 ETM+	2004/03/23	116	34
Landsat7 ETM+	2000/03/13	115	34	Landsat7 ETM+	2004/04/01	115	34
Landsat7 ETM+	2000/04/06	115	34	Landsat7 ETM+	2004/04/17	115	34
Landsat7 ETM+	2000/05/08	115	34	Landsat7 ETM+	2004/04/24	116	34
Landsat7 ETM+	2000/09/04	116	34	Landsat7 ETM+	2004/06/11	116	34
Landsat7 ETM+	2000/09/29	115	34	Landsat7 ETM+	2004/07/29	116	34
Landsat7 ETM+	2001/09/23	116	34	Landsat7 ETM+	2004/09/24	115	34
Landsat7 ETM+	2001/11/19	115	34				

Table 3. Landsat-5 TM Spectral Radiance Range (Chander and Markham, 2003).

TM Spectral Radiance Range watts/(meter squared * ster * μm)				
Band Number	From March 1, 1984 to May 4, 2003		After May 5, 2003	
	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX
1	-1.52	152.10	-1.52	193.0
2	-2.84	296.81	-2.84	365.0
3	-1.17	204.30	-1.17	264.0
4	-1.51	206.20	-1.51	221.0
5	-0.37	27.19	-0.37	30.2
6	1.2378	15.303	1.2378	15.303
7	-0.15	14.38	-0.15	16.5

RESTEC 방법, 그리고 Quadratic 방법이 존재한다. 본 연구에서는, post-calibration에 의한 방법으로 계산치와 실측치 사이에서 높은 상관관계를 보여주는(정종철, 유신재, 1998) NASA 경험식을 이용하여 다음과 같이 위성온도(T)를 구하였다.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

T = effective at-satellite temperature in Kelvin;
 K2 = calibration constant 2 in Kelvin;
 K1 = calibration constant 1 in Kelvin;

NASA 경험식은 Landsat-5 TM과 Landsat-7 ETM+에 대하여 수식 (2)를 동일하게 사용하지만 취하

Table 4. Landsat-7 ETM+ Spectral Radiance Range(Chander and Markham, 2003).

ETM+ Spectral Radiance Range watts/(meter squared * ster * μm)								
Band Number	Before July 1, 2000				After July 1, 2000			
	Low Gain		High Gain		Low Gain		High Gain	
	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX
1	-6.2	297.5	-6.2	194.3	-6.2	293.7	-6.2	191.6
2	-6.0	303.4	-6.0	202.4	-6.4	300.9	-6.4	196.5
3	-4.5	235.5	-4.5	158.6	-5.0	234.4	-5.0	152.9
4	-4.5	235.0	-4.5	157.5	-5.1	241.1	-5.1	157.4
5	-1.0	47.70	-1.0	31.76	-1.0	47.57	-1.0	31.06
6	0.0	17.04	3.2	12.65	0.0	17.04	3.2	12.65
7	-0.35	16.60	-0.35	10.932	-0.35	16.54	-0.35	10.80
8	-5.0	244.00	-5.0	158.40	-4.7	243.1	-4.7	158.3

Table 5. Thermal Band Calibration Constant.

Units	W/(m ² * sr * μm)	Kelvin
Constant	K1	K2
Landsat5	607.76	1260.56
Landsat7	666.09	1282.71

는 상수는 각각 다르다. Table 5는 각각의 상수 K1과 K2를 나타낸 것이다. Landsat-7 ETM+의 경우에는 열적외선 밴드가 high gain과 low gain의 두 가지로 구성되어 있어서 서로 다른 값을 사용하여 온도를 산출한다. 두 밴드를 사용하여 추출한 T의 차이는 평균 0.5℃ 이하로 나타났으며, 이는 본 연구의 수온오차 범위에 비하여 미미하기 때문에 어느 밴드를 사용하여도 무방한 것으로 판단되었다.

위와 같은 방법으로 1994년부터 2004년까지 얻어진 29개 Landsat 열적외선 low gain 영상에서 T값을 계산하였다. 각 댐호 별로 Fig. 2에 나타난 현장 수온 측정 지점을 중심으로 5×5 이상, 10×10 이하의 픽셀로 이루어진 구역의 T값을 평균하여 측정지점의 위성관측수온(T_{sat})을 산출하였다. 이 때, 각 구역에서 T값의 표준편차는 0.5℃ 이하를 보여, 측정지점을 중심으로 공간적인 수온 변화는 많지 않은 것으로 나타났다. 한편, 겨울 영상에서 호수 표면의 얼음에 의한 0℃ 이하의 온도는 자료에서 제외하였다.

위에서 얻어진 T_{sat}을 현장에서 측정한 실측 자료와 시계열적으로 비교 분석해 보았다. Fig. 3은 각 댐호에

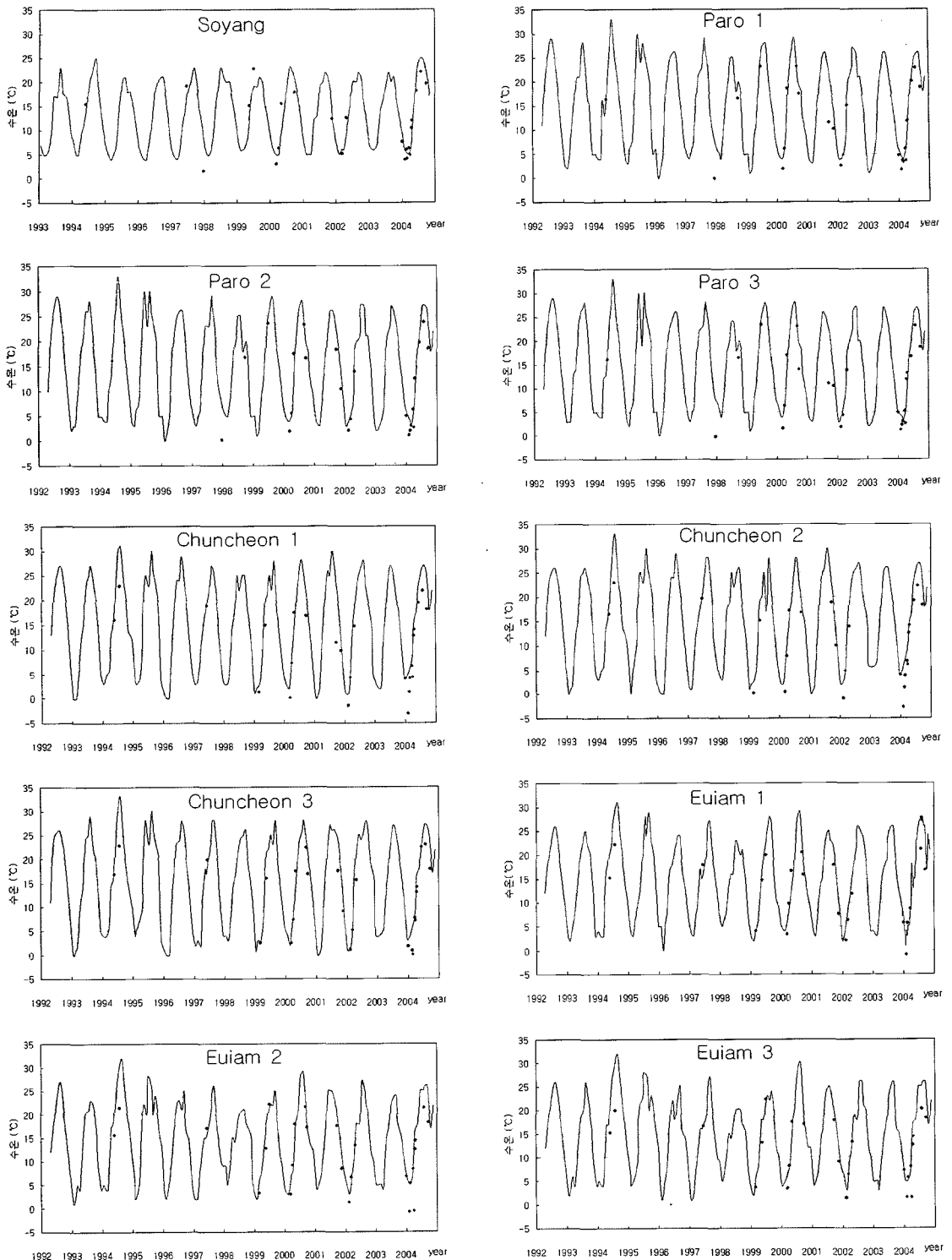


Fig. 3. Time series of *in situ* water temperature (lines) and at-satellite temperature derived from Landsat thermal band (dots) on lakes in the Han river system.

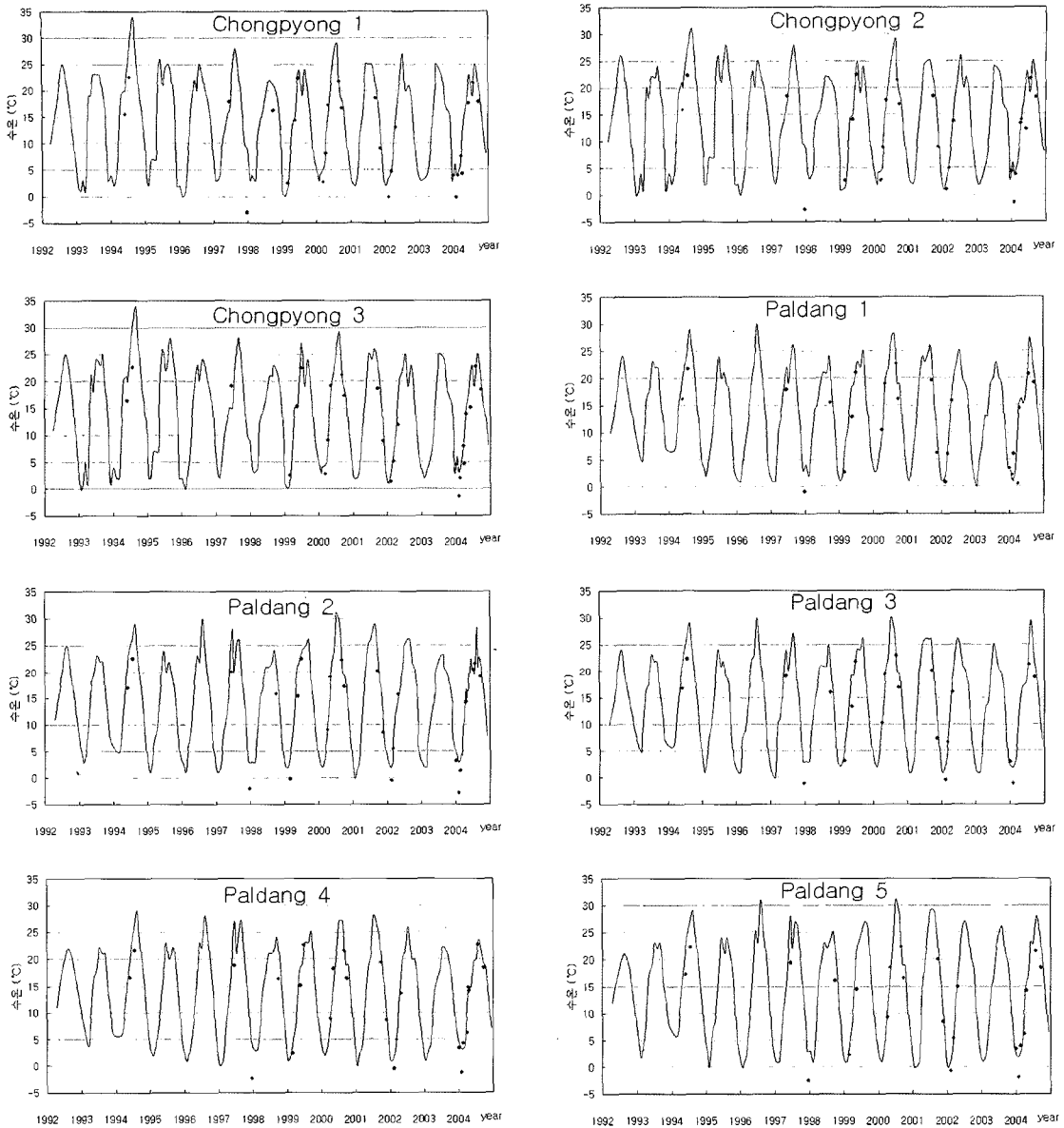


Fig 3. Continued.

서의 실측수온 자료와 Landsat 열적외선 영상에서 추출한 T_{sat} 과 비교한 그래프이다. 이 그래프의 실선은 호수의 표층 및 상층에서 측정된 실측수온을 나타내고, 점들은 T_{sat} 을 나타낸다. 여기서 실측수온과 T_{sat} 이 어느 정도 상관성을 가지는 것을 볼 수는 있지만 이를 정량화시킬 수는 없었다. 왜냐하면, 실측수온 자료는 매달 1회 측정된 자료이므로 위성 관측이 이루어진 날짜 및 시간

에 정확히 얻어진 실측수온은 존재하지 않기 때문이다. 따라서 이 연구에서는 실측수온 자료를 보간하여 정량적 해석을 아래와 같이 시도하였다.

4. 실측보간수온과 위성관측수온 비교

위성 관측일의 실측수온을 추정하기 위하여, 매월 1

회 각 댐호들에서 측정된 실측수온 자료를 cubic-spline 방법으로 시간적으로 보간(interpolation)하여 실측보간수온(T_{inp})을 구하였다. 각 댐호의 현장수온 측정 지점에서 T_{inp} 와 T_{sat} 의 상관도는 Fig. 4와 같다. 그리고 T_{sat} 과 T_{inp} 의 차이를 나타내는 수온오차(ΔT)를 다음과 같이 구하였다.

$$\Delta T = T_{sat} - T_{inp} \quad (3)$$

각 댐호별 수온오차의 시간적 평균($\overline{\Delta T_{temporal}}$)과 그 표준편차($\sigma_{temporal}$), 그리고 T_{inp} 와 T_{sat} 의 상관계수(ρ , correlation coefficient)는 Fig. 4에 표시하였다. 이때, 자료 처리 과정에서 ΔT 값이 $\overline{\Delta T_{temporal}}$ 을 중심으로 $\sigma_{temporal}$ 의 2배 이상 벗어나는 outlier는 제거하였으며, 이를 통해 약 5%의 자료가 제거되었다. 이러한 비정상적으로 큰 ΔT 의 원인으로는 위성온도 산출시 대기오차, 수온 실측의 오차, 월별 자료의 보간에 따른 문제 등이 있을 수 있으나, 여기서는 더 이상의 분석이 불가능하다.

댐호별 $\overline{\Delta T_{temporal}}$ 의 값을 살펴보면, 소양호에서는 0.4°C로서 양의 값을 가지고 있으나, 다른 댐호들에서는 -2.4°C에서 -0.9°C까지의 음의 값을 보여준다. 또한 소양호에서의 $\sigma_{temporal}$ 은 2.5°C로서, 1.5°C에서 2.7°C를 가지는 전체 댐호들의 $\sigma_{temporal}$ 중에서 비교적 큰 값을 가진다. ρ 값은 소양호에서는 0.915로서, 다른 호수에 비하여 낮은 상관계수를 보였다. 소양호를 제외한 호수의 ρ 값은 0.951에서 0.980으로서, 비교적 높은 상관관계를 보이고 있다.

앞서 지적한 바와 같이, 소양호에서는 깊이 10미터에서 수온을 실측하였고, 다른 댐호들에서는 표면에서 실측하였기 때문에, 소양호보다 다른 댐호들에서 ρ 값이 크게 나타나는 것으로 해석할 수 있다. 또한 소양호는 다른 댐호들과는 달리 한강 수계 최상부에 위치하고 수심이 깊은 호소형 댐호라는 차별성을 가지고 있다. 소양호에서의 이러한 이상 수온 오차 현상은 성층현상과 관련하여 다음 절에서 설명될 것이다.

여기서 대부분의 댐호들에서 ρ 값이 비교적 높게 나타나는 것은 매우 흥미로운 것으로서 주목할 만하다. 호수의 표면수온은 일조량, 풍속, 기온, 강수량 등에 따라 일변화를 겪게 되고, 매월 1회 실측일과 위성관측일 사이에는 크게는 15일까지 차이가 난다. 따라서 매월 1회

측정한 실측수온을 보간하여 위성관측일의 수온을 추정. 한 T_{inp} 값과 위성에서 측정한 T_{sat} 의 상관성을 기대할 수 없을 것으로 예상되었다. 그러나 위에서 본 바와 같이 T_{inp} 와 T_{sat} 이 비교적 높은 상관계수를 가지는 것으로 볼 때, 호수 표면수온의 일변화 및 월변화가 비교적 연속적이면서 안정적으로 변화되며, T_{inp} 값이 위성관측일의 실측수온에 근사함을 알 수 있다.

한편, 댐호별 $\overline{\Delta T_{temporal}}$ 값이 대부분 음의 값을 가지는데, 이는 대기보정이 필요하다는 것을 암시한다. 우리는 시계열 영상을 이용한 통계적 대기보정 방법을 다음과 같이 고안하여 적용하였다.

5. 통계적 대기보정

대기 중에 있는 구름, 수증기, 먼지 및 에어로졸에 의해 지구 복사 열적외선이 흡수될 경우, 위성관측수온이 실측수온보다 작게 된다. 구름의 경우에는 가시광선 영상이나 근적외선 영상에서 쉽게 판독할 수 있으나, 수증기, 먼지, 에어로졸 등은 가시광선이나 근적외선 영역에서는 잘 보이지 않는 미세한 입자들로 형성되어 있으므로 육안으로 판독하기 힘들고 보정이 어렵다.

NOAA 위성의 AVHRR의 경우 파장이 서로 다른 두 개의 열적외선 밴드를 이용하여 열적외선의 대기 중 흡수량을 계산해 낼 수 있다. 그러나 Landsat은 열적외선 밴드가 하나 밖에 존재하지 않는다. Landsat-7 열적외선 영상은 공간해상도가 60m (Landsat-5는 120m)이기 때문에 육지의 호수나 강을 관찰하는데 용이한 반면에, AVHRR 영상은 1.1km의 공간해상도를 가지고 있으므로 연구지역의 호수 영상에는 적용할 수 없다. Landsat과 AVHRR 영상을 서로 상호보완적으로 사용할 수 있겠으나, 극궤도 위성의 촬영 주기에 비해서 대기의 흐름이 빠르고 두 센서가 동일한 시기에 촬영한 영상을 얻기가 힘들기 때문에 다양한 시기에 시계열로 얻어진 영상에 대해 적용하는데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 시계열 Landsat 영상을 이용한 통계적 대기보정 방법을 새롭게 시도하였다. 위의 통계 자료에 의하면 소양호를 제외한 파로호, 춘천호, 의암호, 청평호, 팔당호의 ρ 값이 0.951 이상으로 높게 나

Analysis of Lake Water Temperature and Seasonal Stratification in the Han River System from Time-Series of Landsat Images

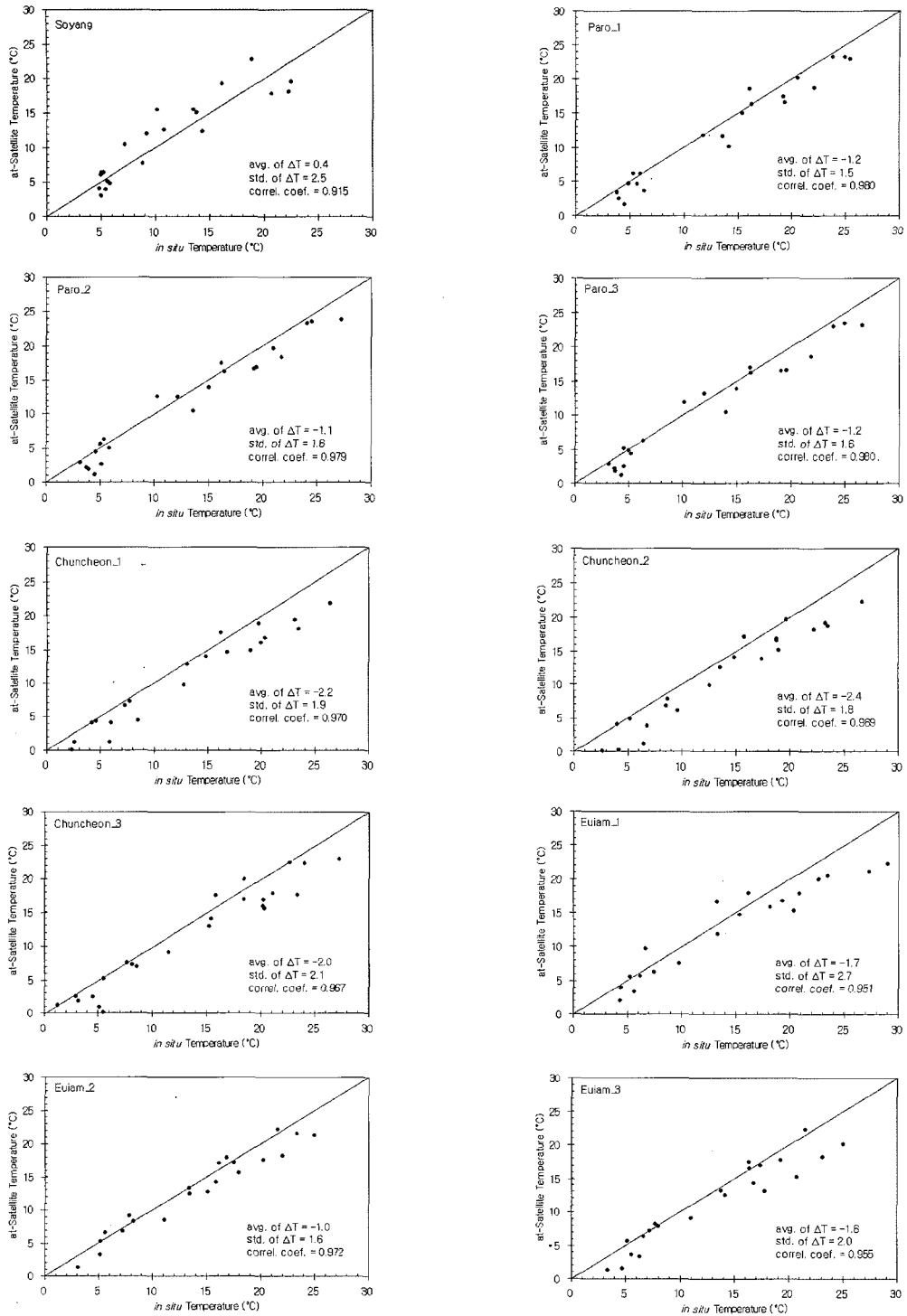


Fig 4. Relationship between the interpolated *in situ* and at-satellite water surface temperature (T_{intp} and T_{sat} respectively) on each lake. The average and standard deviation of temperature difference ($\overline{\Delta T}_{temporal}$ and $\sigma_{temporal}$ respectively), and the correlation coefficient (ρ) were calculated over time. Outliers outside 2σ from the $\overline{\Delta T}_{temporal}$ were removed. Note correlation coefficient at Lake Soyang (0.915) is lower than those of other lakes (0.951-0.980).

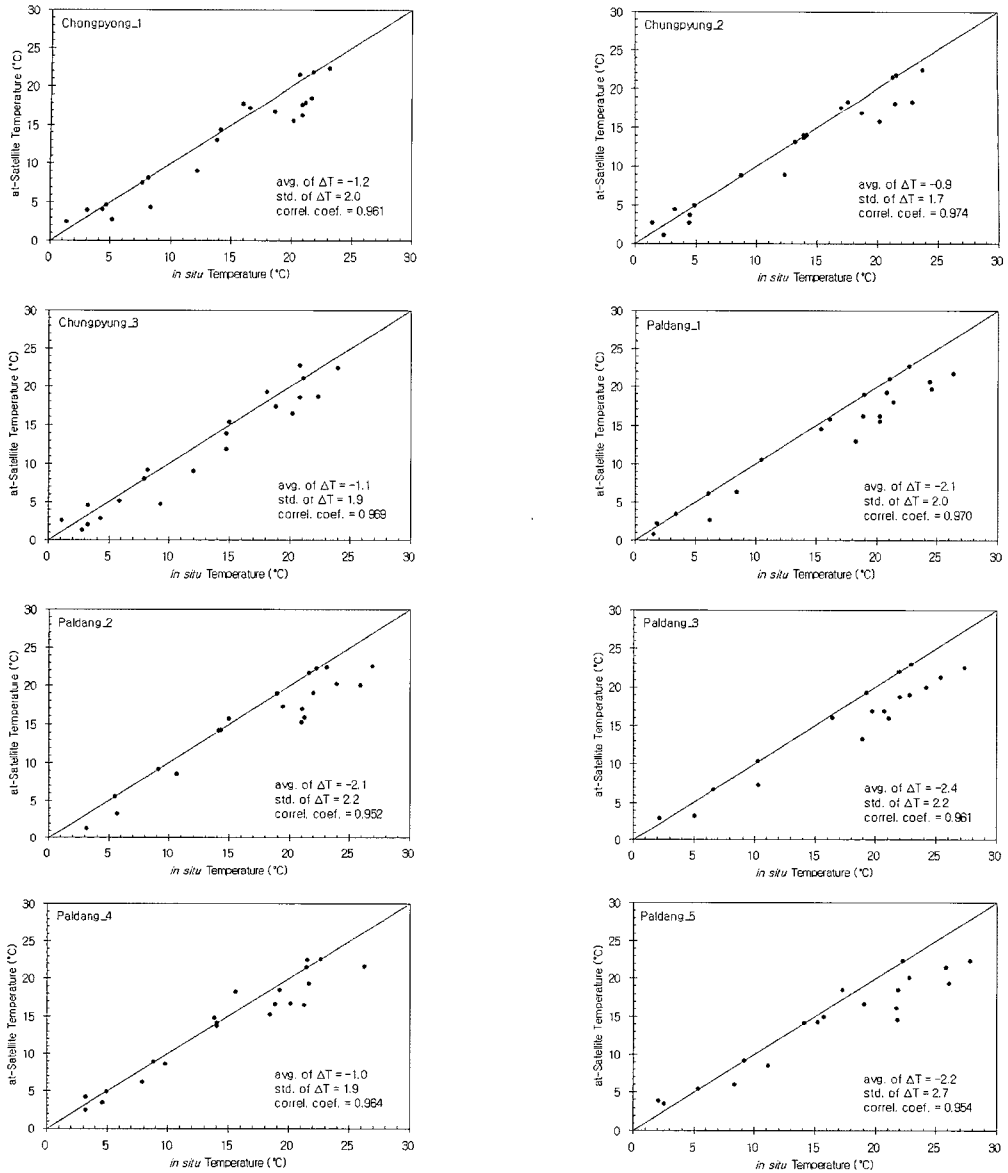


Fig 4. Continued.

타났다. 이 호수들의 자료를 이용하여 각 영상의 대기 흡수에 의한 온도 감소 효과를 통계적으로 다음과 같이 역산해 낼 수 있다.

이상 수온오차 현상을 보이는 소양호를 제외한 댐호들의 ΔT 값의 공간적(시간적)이 아님 평균값($\overline{\Delta T_{spatial}}$)과 그 표준 편차($\sigma_{spatial}$)를 각 영상별로 구하였다(Table 6). 총 29개의 Landsat 영상 중 위의 outlier 제거 과정에서 한 영상이 완전히 제거되어 28개의 Landsat 영상이

자료처리에 사용되었다. $\overline{\Delta T_{spatial}}$ 값은 -5.2°C 에서 1.2°C 사이에 고루 분포하였으며, $\sigma_{spatial}$ 값이 1.0°C 이하인 영상이 12개, 2.0°C 이하인 영상은 12개, 그리고 2.0°C 보다 큰 영상은 4개였다. 이 때, $\sigma_{spatial}$ 값이 충분히 작은 영상은 수증기, 먼지, 에어로졸이 영상 전체에 같은 농도로 퍼져 있어서 대기에 의한 온도 감소 효과가 공간적으로 균일하다는 것을 의미한다. 따라서 경험적으로

Table 6. Statistics of temperature difference between satellite-derived and *in situ* measured (and interpolated) temperature on the lakes in the Han river. All data taken on 1997-12-15 were deleted for outlier removal. Four other satellite images (grey background) take were unable to perform statistical atmospheric correction due to standard deviation of temperature difference higher than 2.0°C.

Year	mm-dd	ΔT^{atmc} Statistics Before Statistical Atmospheric Correction (°C)				ΔT^{atmc} Statistics After Statistical Atmospheric Correction (°C)			
		average*	std.*	average** $\overline{\Delta T}_{spatial}$	std.** $\sigma_{spatial}$	average*	std.*	average** (zero by nature)	std.** (same as before)
1994	06-01	-2.8	2.2	-3.1	1.8	0.3	2.2	0.0	1.8
1994	07-26	-5.2	1.0	-5.2	0.9	0.0	1.0	0.0	0.9
1997	06-16	-0.8	3.6	-1.2	3.0	uncorrected			
1997	12-25	All data deleted by outlier removal							
1998	10-02	-4.3	1.0	-4.3	1.2	0.0	1.0	0.0	1.2
1999	03-02	-0.9	1.8	-0.9	1.6	0.0	1.8	0.0	1.6
1999	05-21	-3.0	2.7	-3.3	2.5	uncorrected			
1999	06-30	-0.4	1.7	-0.7	1.1	0.3	1.7	0.0	1.1
2000	03-13	-2.3	4.3	-2.4	0.7	0.1	4.3	0.0	0.7
2000	04-06	0.3	1.6	0.2	0.9	0.1	1.6	0.0	0.9
2000	05-08	1.4	2.1	1.2	0.9	0.2	2.1	0.0	0.9
2000	09-04	-0.6	1.0	-0.6	0.9	0.0	1.0	0.0	0.9
2000	09-29	-2.2	0.9	-2.1	0.9	-0.1	0.9	0.0	0.9
2001	09-23	-3.6	1.6	-3.6	1.2	0.0	1.6	0.0	1.2
2001	11-19	-2.7	1.7	-2.7	0.7	0.0	1.7	0.0	0.7
2002	02-14	-1.5	1.0	-1.5	0.7	0.0	1.0	0.0	0.7
2002	03-11	-0.2	0.8	-0.2	0.5	0.0	0.8	0.0	0.5
2002	04-28	-1.0	2.0	-1.2	1.4	0.2	2.0	0.0	1.4
2004	01-03	-0.3	1.8	-0.2	1.0	-0.1	1.8	0.0	1.0
2004	02-04	-2.3	1.2	-2.4	1.6	0.1	1.2	0.0	1.6
2004	02-20	-1.1	1.2	-1.2	2.1	uncorrected			
2004	02-28	-1.7	1.4	-1.9	2.0	0.2	1.4	0.0	2.0
2004	03-23	0.1	1.5	0.0	0.8	0.1	1.5	0.0	0.8
2004	04-01	-2.7	1.7	-2.9	1.1	0.2	1.7	0.0	1.1
2004	04-17	0.0	2.2	-0.3	1.4	0.3	2.2	0.0	1.4
2004	04-24	-0.4	2.0	-0.6	0.9	0.2	2.0	0.0	0.9
2004	06-11	-2.5	1.3	-2.3	1.6	-0.2	1.3	0.0	1.6
2004	07-29	-2.8	2.3	-2.8	2.4	uncorrected			
2004	09-24	-3.2	1.1	-3.2	1.1	0.0	1.1	0.0	1.1

*: values calculated over all lakes

**: values calculated excluding Lake Soyang

$\sigma_{spatial}$ 이 2.0°C 이하인 24개 영상에 대하여 $\overline{\Delta T}_{spatial}$ 을 이용하여 각 영상의 대기흡수온도(T^{atm})를 아래와 같이 추정하였다.

$$T^{atm} = \overline{\Delta T}_{spatial} \quad (4)$$

$\sigma_{spatial}$ 이 2.0°C보다 큰 4개 영상은 대기 효과가 공간적으로 불균질하며, 이들 영상에 대하여서는 위 관계식

이 성립하지 않는다. Fig. 5는 위와 같은 통계적인 방법으로 대기보정이 가능한 두 영상과 불가능한 두 영상을 예시하였다. Fig. 5(a), (b) 영상은 $\sigma_{spatial}$ 이 2.0°C 이하로서 대기 효과가 공간적으로 균일하기 때문에 통계적 대기보정이 수행 가능한 경우이다. 두 영상 모두 얇은 구름(cirrus)이나 박무(haze)가 약하게 있지만, 영상 전체에 골고루 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 반면에, Fig. 5(c), (d)는 $\sigma_{spatial}$ 이 표준편차가 2.0°C 보다 큰 값을 가진다. 얇은 구름이 지역적으로 균일하지 않게 분포하고 있으며, 짙은 구름으로 인하여 일부 호수에서는 위성수온 관측이 불가능한 지점도 보인다. 이런 영상들은 통계적 대기보정이 불가능하다. 여기서 주목할 사항은 2004년부터 Landsat-7 ETM+ 센서의 SLC(Scan

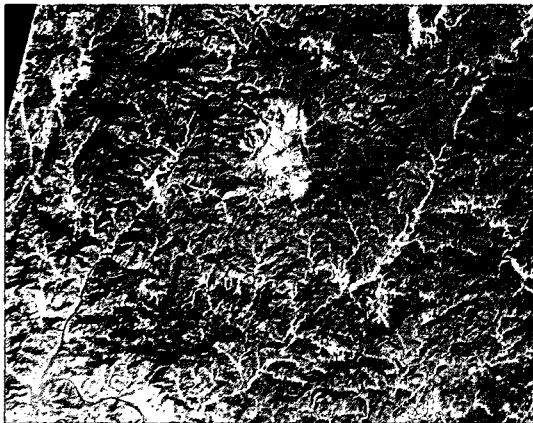
Line Corrector)의 고장으로 인해서 (b), (c)에서 보듯이 가로 줄무늬의 자료 손실이 있었으나, 위성수온 측정 위치를 조금씩 수정하여 큰 오차 없이 자료를 얻을 수 있었다.

위에서 구해진 T^{atm} 값을 이용하여 대기보정 후 위성 관측온도(T_{sat}^{atmc} ; atmospherically corrected at-satellite temperature)와 대기보정 후 수온오차(ΔT^{atmc})를 다음과 같이 구하였다.

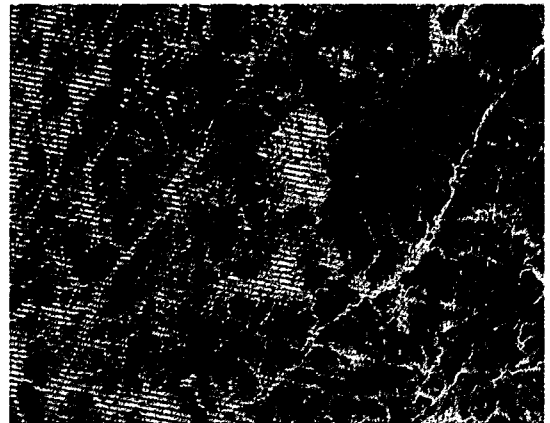
$$T_{sat}^{atmc} = T_{sat} + T^{atm} \quad (5)$$

$$\Delta T^{atmc} = \Delta T + T^{atm} \quad (6)$$

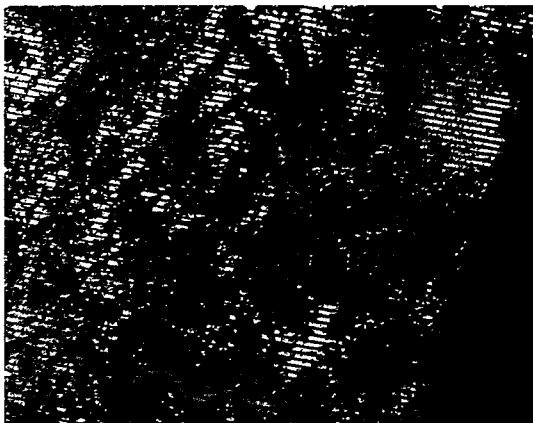
즉, $\Delta T^{atmc} = T_{sat}^{atmc} - T_{inp}$ 가 성립함을 알 수 있다. Fig. 6은 위의 대기보정의 과정을 보여주고 있다. 여기



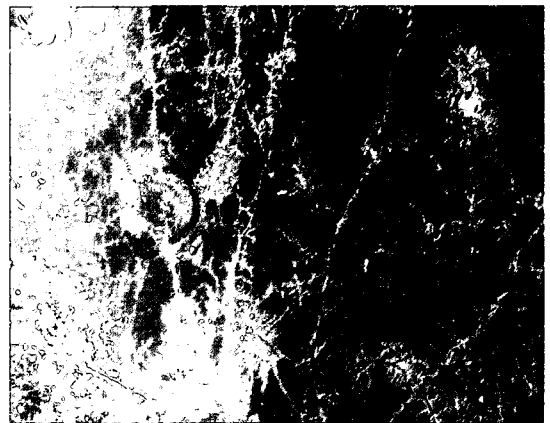
(a) 2001. 11. 19. mean=-2.7 std=0.7



(b) 2004. 09. 24. mean=-3.2 std=1.1



(c) 2004. 07. 29. mean=-2.8 std=2.4



(d) 1997. 06. 16. mean=-1.2 std=3.0

Fig 5. Examples of atmospheric correction. (a) and (b) are the successful cases while (c) and (d) are the cases unable to correct atmospheric effect due to high value of standard deviation (scene inhomogeneity).

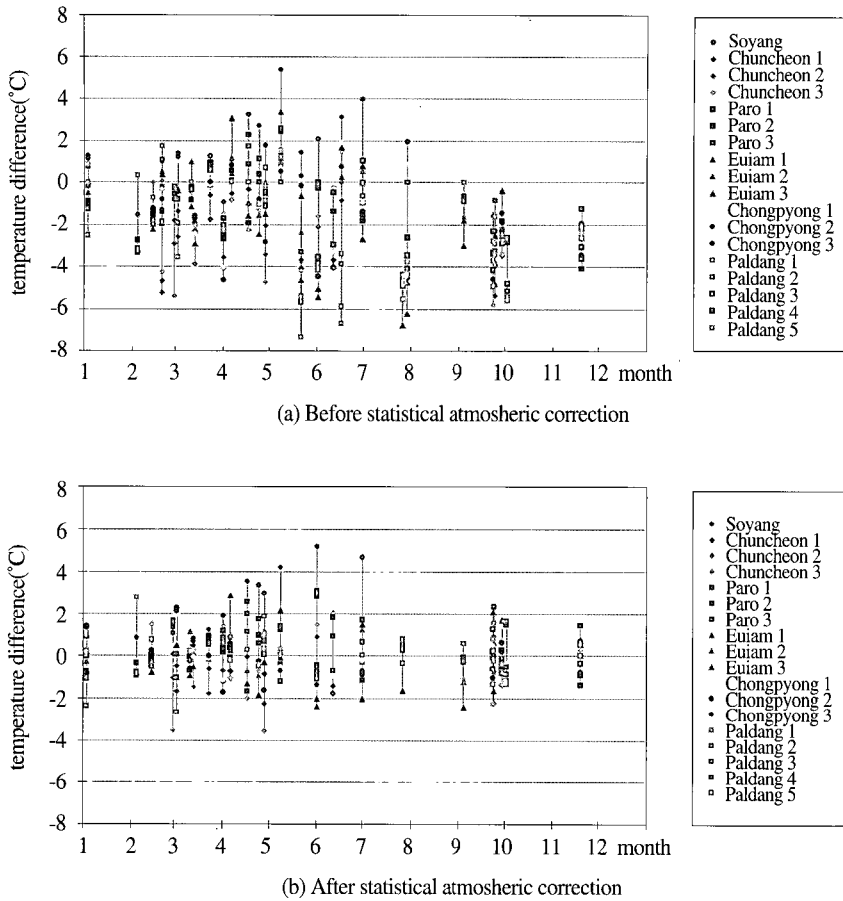


Fig 6. Process of statistical atmospheric correction. Monthly temperature difference between at-satellite and interpolated *in situ* measurement (a) before and (b) after statistical atmospheric correction. Vertically lines are obtained from one satellite image take. Temporally averaged (excluding Soyang) temperature difference is regarded as atmospheric absorption temperature for images with standard deviation less than 2°C, and used for correction. Four images with standard deviation higher than 2°C are deleted during statistical atmospheric correction.

서 주의할 점은, 식(4)에서 T^{atm} 값을 구하는데 있어서는 소양호를 제외하였으나, 식 (5)와 (6)의 대기보정은 소양호에도 시행하였다는 것이다.

댐호의 현장수온 측정 지점에서 T_{inp} 와 대기보정 된 T_{sat}^{atmc} 의 상관도는 Fig. 7과 같다. 대기보정 후 수온오차의 시간적 평균($\overline{\Delta T_{temporal}^{atmc}}$)과 그 표준편차($\sigma_{temporal}^{atmc}$), 그리고 T_{inp} 와 T_{sat}^{atmc} 의 상관계수(ρ^{atmc} , correlation coefficient) 역시 Fig. 7에 도시하였다.

대기보정 후의 $\overline{\Delta T_{temporal}^{atmc}}$ 값은 전체적으로 대기보정 전에 비하여 높아졌다. $\overline{\Delta T_{temporal}^{atmc}}$ 의 값을 살펴보면, 소양호에서는 1.5°C로서 비교적 큰 양의 값을 가지고 있는

데 반하여, 다른 댐호들에서는 -0.7°C에서 0.6°C까지 고른 분포를 보여준다. $\sigma_{temporal}^{atmc}$ 값은 전체적으로 대기보정 후 작아져서, $\overline{\Delta T_{temporal}^{atmc}}$ 의 값이 T_{inp} 값에 보다 근접해졌음을 알려준다. 그러나 소양호의 $\sigma_{temporal}^{atmc}$ 는 2.0°C로서, 0.6°C에서 1.6°C를 가지는 다른 댐호들 보다 큰 값을 가진다. ρ^{atmc} 값은 모든 호수에서 대기보정 후 값이 증가하여, 위성관측수온과 실측보간수온의 상관도가 높아졌음을 알 수 있다. 그러나 소양호의 ρ^{atmc} 는 0.950로서, 0.979에서 0.997의 값을 가지는 다른 호수에 비하여 낮은 상관계수를 보였다.

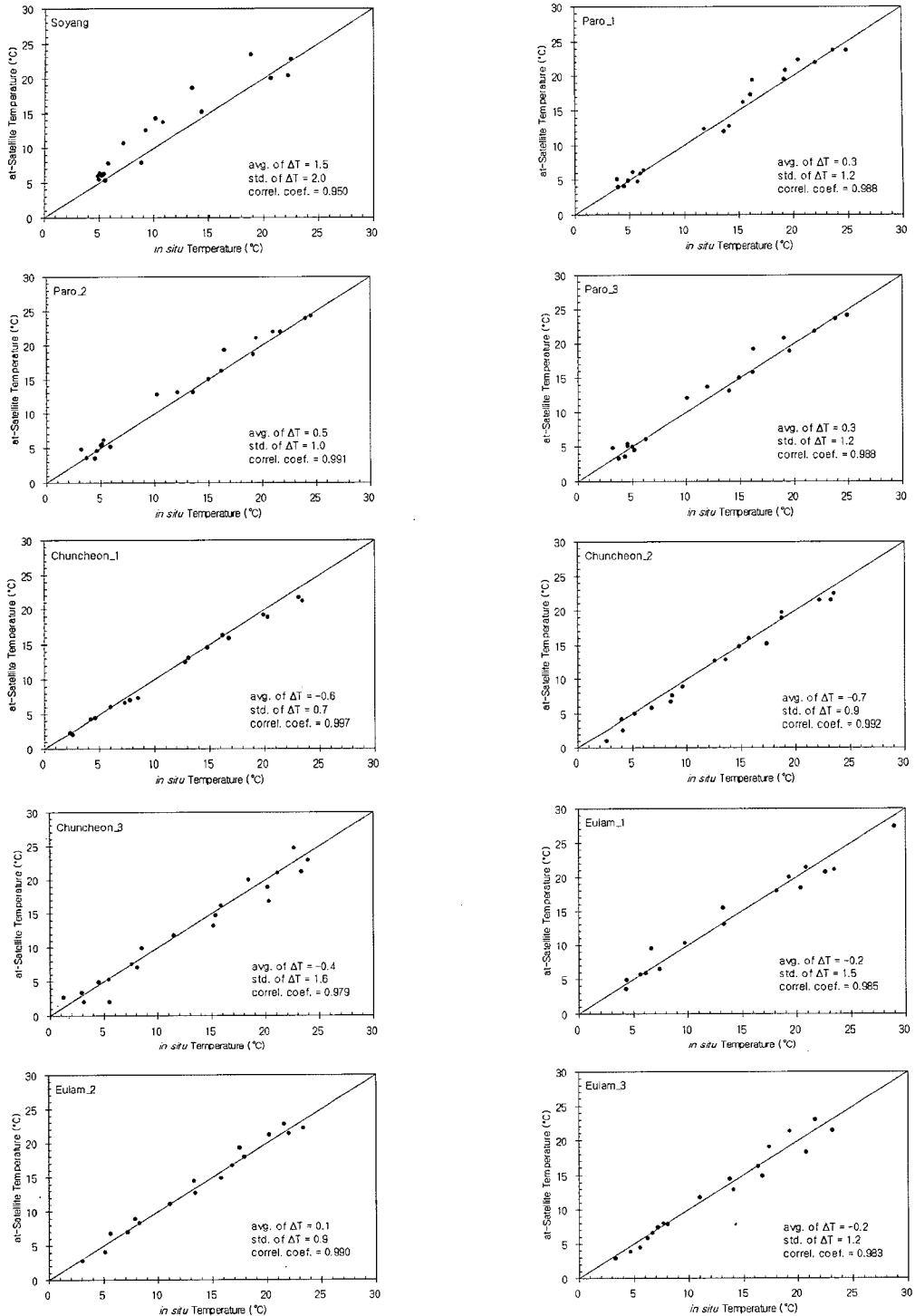


Fig 7. Relationship between the interpolated *in situ* and at-satellite water surface temperature ($T_{in\,situ}$ and T_{sat}^{atmc} respectively) on each lake after applying statistical atmospheric correction. The average and standard deviation of temperature difference ($\overline{\Delta T_{temporal}^{atmc}}$ and $\sigma_{temporal}^{atmc}$ respectively), and the correlation coefficient (ρ^{atmc}) were calculated over time. Note correlation coefficient is improved from 0.915 to 0.950 at Lake Soyang and from 0.951-0.980 to 0.979-0.997 at other lakes after applying statistical atmospheric correction.

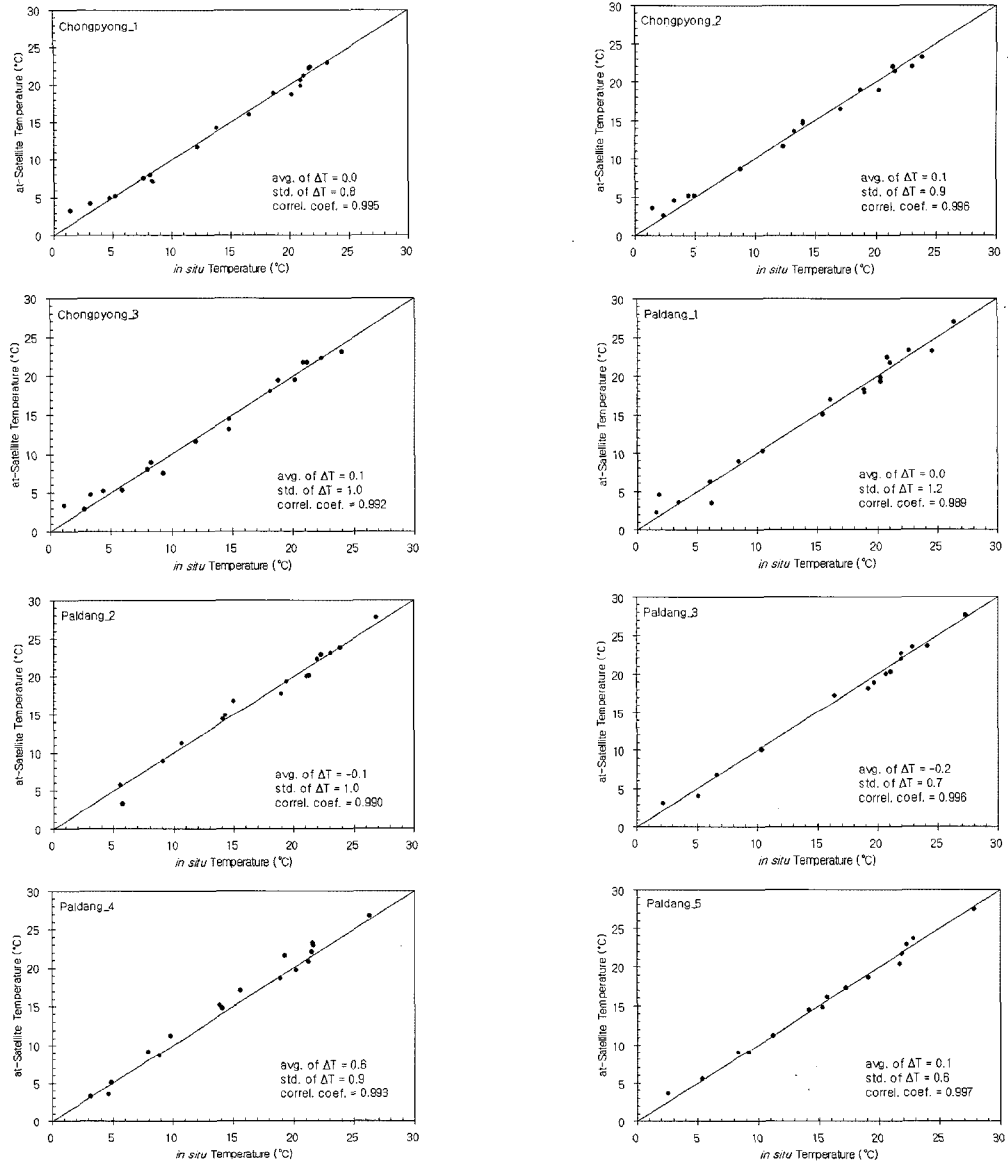


Fig 7. Continued.

6. 소양호의 성층현상 분석

수온오차의 계절적 및 월별 특성을 알아보기 위하여, ΔT^{atmc} 의 월별 변화를 그래프로 그려 보았다(Fig. 8). 소양호에서는 총 18개의 측정값 중 4-7월 6개 측정값에서 보정된 위성관측수온이 실측보간수온보다 3-5°C 높게 측정되었다. 즉, 4-7월에 소양호에서의 ΔT^{atmc} 가 오차 범위인 $\sigma_{spatial} = 2.0^{\circ}\text{C}$ 보다 2배 이상 높게 벗어나는 이

상 수온오차 현상을 보이고 있다. 한편, 한강 수계 하류의 다른 호수들에서도 일부 양의 ΔT^{atmc} 을 보이는 자료가 있지만, 대부분 오차 범위 이내에 있기 때문에 이상 수온현상으로 규정할 수 없다. 소양호에서 이상 수온오차 현상은 대기흡수에 의한 위성관측온도 감소 현상과는 반대되는 현상이다. 이와 같이 대기보정 전 후, 호수에 따라 수온오차가 서로 다른 양상을 보이는 것은, 하천형 댐호와 호소형 댐호의 서로 다른 특성, 그리고 실측 수심

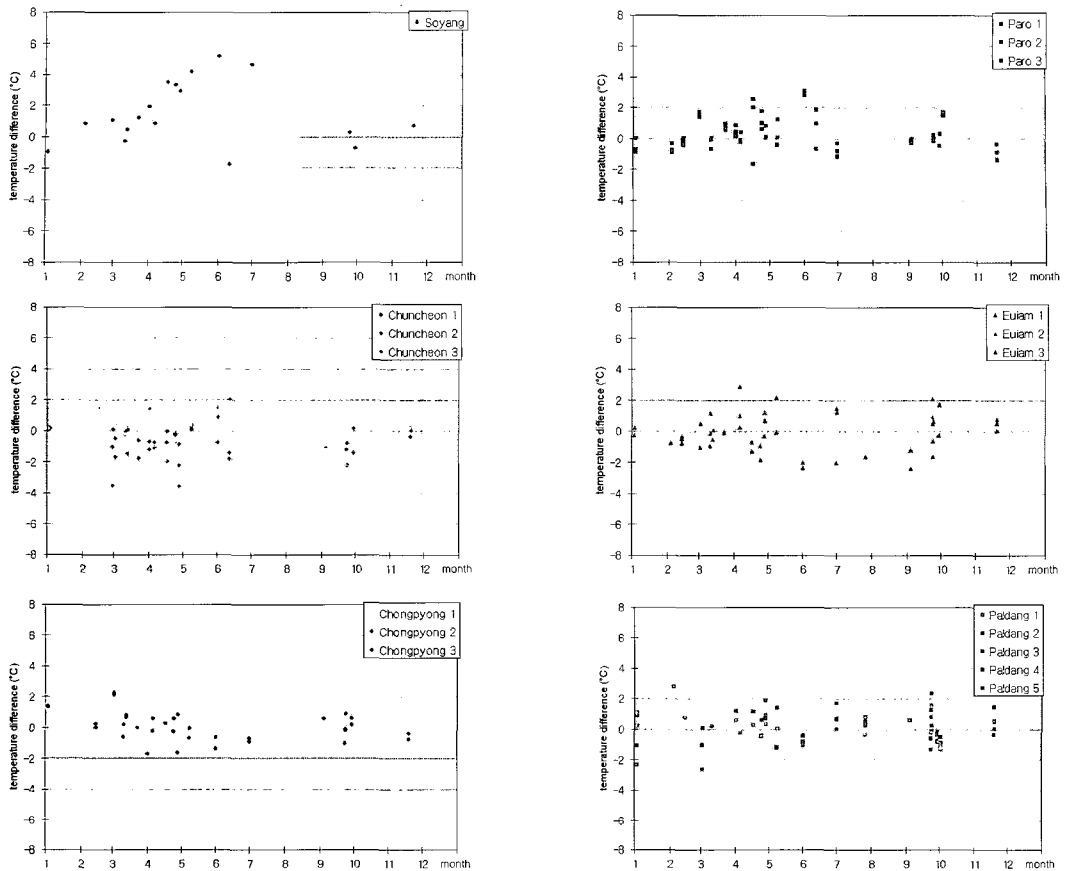


Fig 8. Seasonal variation of temperature difference on the lakes after statistical atmospheric correction (ΔT^{atm}). Note large deviation ($\sigma_{temporal}^{atm} > 2^{\circ}C$) at Lake Soyang from April to July, while other lakes have smaller deviation ($\sigma_{temporal}^{atm} < 2^{\circ}C$).

의 차이에서 기인한 것으로 다음과 같이 분석되었다.

먼저, 이 현상을 설명할 수 있는 세 가지 가설을 검토해 보았다. 첫째, 위성수온 계산상의 오차가 있을 수 있다. 소양호를 제외한 다른 댐호에서 ρ^{atm} 값이 매우 높게 나타나기 때문에 방사휘도 값을 위성수온으로 변환시키는데 사용한 NASA 경험식은 통계적 분석 과정에서 수온오차의 표준편차가 $2^{\circ}C$ 이하로 비교적 정확하다고 할 수 있다. 또한 소양호에서만 편차 범위를 크게 벗어나기 때문에, 위성수온 산출에 의한 오차라고 말할 수 없다.

둘째, 소양강 수질 상태의 계절적인 변화로 4-7월에 호수물이 열적외선 파장에 대한 흑체의 성질을 벗어났기 때문일 수 있다. 호수에 녹조현상이 발생하거나 호수 표면에 클로로필과 부유물질 등의 농도가 매우 높을 때, 호수 표면의 부유물질이 태양 복사 에너지를 반사시켜

흑체의 성질을 잃게 되고, 이 때문에 위성관측수온이 실측수온보다 높게 나타날 수 있다는 것이다. 그러나 녹조 현상은 호수의 부영양화가 심화되는 가을철에 주로 발생하기 때문에, 본 연구에서 관찰된 이상 수온오차 현상이 발생하는 시기와는 맞지 않다. 또한, 한강 수계 호수 중에서 수질 상태가 가장 좋은 소양호에서만 이상 수온오차 현상이 발생한 점으로 미루어 볼 때 이 가설들은 기각되었다.

마지막으로, 호수별로 실측수온을 측정하는 방법, 특히 수온 측정 수심이 다르다는 것이다. 소양호를 제외한 하류 호수들에서 표층수온을 실측하는 깊이는 30cm이다. 그러나 센서를 30cm 깊이에 넣어서 측정하는 것이 아니라 수면에서 30cm 되는 곳까지의 물을 떠서 밖에서 수온을 측정한다. 이렇게 측정된 수온자료는 표면수

온이라 할 수 있다. 그러나 소양호에서는 2004년 이전까지 수심 10m에서 측정된 '상층수온'이며, 2004년 이후 부터는 수심 5m 깊이에서 측정하기 시작하였다. 즉, 소양호에서의 상층수온 측정치는 위성이 측정하는 표면수온과 일치하지 않는 것이다. 그 결과 소양호를 제외한 하류 댐호에서의 위성관측수온과 실측보간수온이 높은 상관도를 보인 것이며, 소양호에서는 비교적 낮은 상관도를 보여준 것이다.

Fig 9. 는 소양강댐 앞의 측정지점에서 2001년에서 2004년까지 4년간에 걸친 연중 수직 온도 분포 자료이다. 호수에서는 온도가 높은 상층수와 온도가 낮은 저층수로 나뉘는 성층현상이 나타난다. 상층부에서는 바람이나 강수에 의한 혼합 작용으로 수온이 일정한 혼합층이 존재하며, 그 아래에는 수심에 따라 수온이 급격히 하강하는 수온약층이 존재한다. 이러한 성층현상은 계절적인 변화를 보인다. 겨울에는 호수 밑바닥까지 냉각되면서 호수 전체 수온이 수심에 관계없이 4℃로서 일

정하게 유지되어 호수 전체가 혼합층을 이룬다. 봄이 되면 기온이 상승하고 일조량이 증가되면서 호수 상층수 온도가 서서히 올라가기 때문에 호수 표면과 그 하부의 온도 사이에 차이가 뚜렷이 나타나는 수온약층이 형성된다. 이러한 수온약층의 두께는 태양 고도가 높은 여름에 가장 뚜렷해진다. 특히 한강 수계의 최상류에 위치하고 수심이 깊은 대표적 호소형 댐호인 소양호에서는, 봄-여름 건조기에 자연적인 물의 유입량이 미약하고 유속이 느리기 때문에 상층수의 혼합층이 잘 발생하지 않고 수온이 표면에서 수심에 따라 증가하는 수온약층이 가장 잘 나타난다(이종변, 1989). 즉, 봄-여름 소양호의 상층수가 안정되어 혼합층이 잘 발생하지 않고 수온약층이 발달하기 때문에, 본 연구에서 위성에서 관측된 표면온도보다 수심 10m에서 측정된 실측수온이 더 높은 이상 수온오차 현상이 나타난 것이다. 가을이 되면 기온 하강과 일조량 감소로 호수 상층부의 물이 냉각되면서 밀도가 높아져 아래로 내려가 대류 현상을 일으켜 혼합

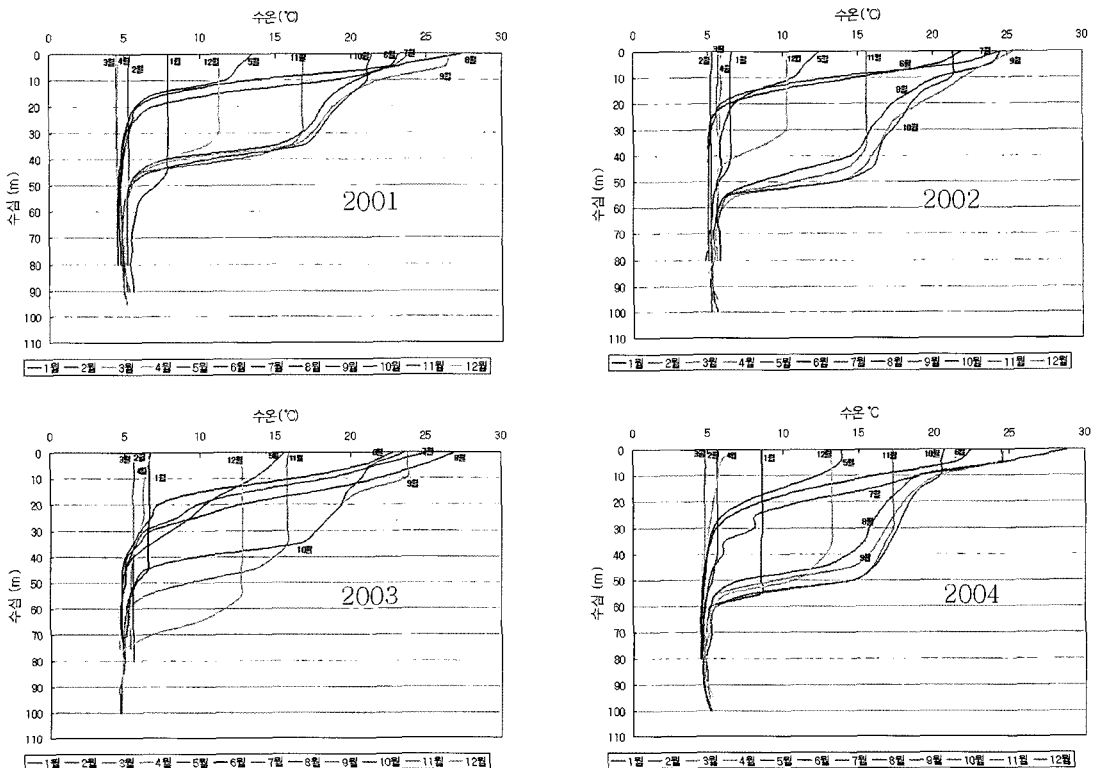


Fig 9. Vertical profiles of water temperature in Lake Soyang from the year 2001 to 2004.

층이 수온약층 위에 서서히 생기기 시작하여 호수 바닥까지 확대된다. 따라서 상층수에 혼합층이 생기는 때에는 수심 10m 수온과 표면수온이 서로 비슷하게 되는 것이다. Fig. 10은 수직온도 분포자료에서 수심 10m 수온과 표면 수온과의 계절적 차이를 극명하게 보여주고 있

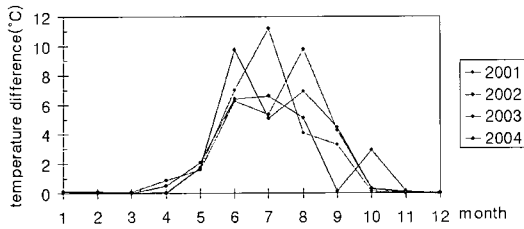


Fig 10. Monthly temperature difference between 10m and 0m depth at Lake Soyang measured from year 2001 to 2004 (derived from Fig. 9).

다. 이는 위성 자료와 실측 자료를 비교한 Fig. 8의 소양호 그래프와 유사한 양상을 보여주고 있다.

반면에 한강 수계에서 소양강댐보다 하류에 위치하며 수심이 비교적 얇은 하천형 댐호들에서는 한강 하류의 수위 조절과 발전을 위해 상부 댐에서 연중 일정한 물을 방류시켜 지속적으로 유입이 이루어진다. 이러한 인위적인 물의 유입과 얇은 수심의 영향으로 하천형 댐호에서는 호수의 표층에서 물의 혼합이 연중 잘 발생하며, 수온약층이 잘 나타나지 않는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 11은 1992년부터 2004년까지 각 댐들의 수문자료로서, 파란색 막대는 월 평균 유입량을 나타내는 것이고 빨간색 막대는 월 평균 방류량을 나타낸다. 한강 수계의 6개 댐 중에서 대표적인 호소형 댐호인 소양호를 형성하는 소양강댐에서는, 유입량이 자연적인 강수 현상에

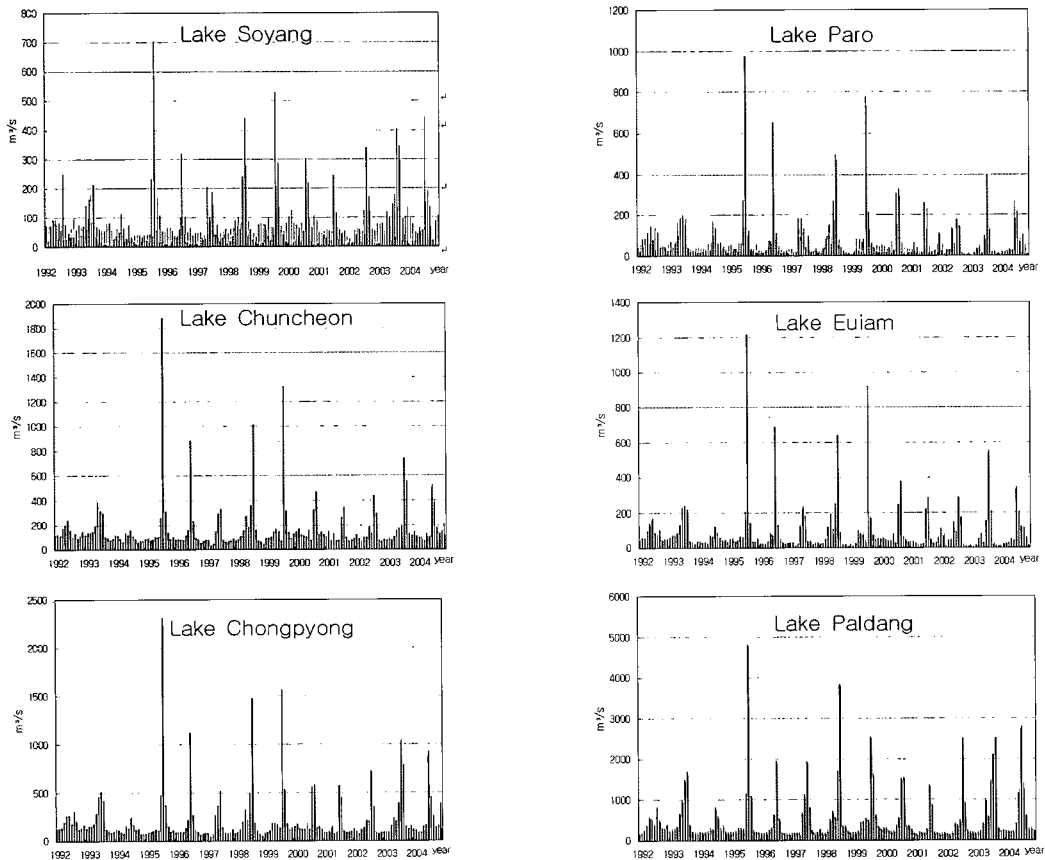


Fig 11. Hydrologic data of Dams of the Han river system. The blue bars are average monthly influx rates and the red bars are the average monthly efflux rates. Note low correlation between influx and efflux rate at Lake Soyang.

의해서만 조절되기 때문에 유입량은 일정하지 않게 나타나는데, 방류량은 하류 댐들의 수위 보전을 위하여 일정한 패턴을 보이는 것을 알 수 있다. 특히, 봄-여름철 건조기에는 자연적인 유입량이 많지 않기 때문에, 유입량으로 인한 물리적 혼합이 적어서 수온약층의 생성이 용이함을 알 수 있다. 하천형 댐호에 속하는 하류 댐에서의 유입량은 상부 댐에서의 방류량 조절로 인하여, 연중 유입량과 방류량이 일정함을 알 수 있다. 따라서 유입량에 의한 물리적 혼합이 지속적으로 일어나고, 수심이 얇기 때문에 호수 상층부에서 연중 혼합층이 항상 존재하게 된다. 따라서 물의 표면수온을 관측하는 위성관측수온과 실측표면수온과의 차이가 작아지게 된다.

댐호의 규모와 지리적 위치에 따른 유입량과 방출량, 그리고 수심의 차이점으로 인하여 봄-여름 호소형 댐호인 소양호의 상층수에 혼합층이 잘 나타나지 않고 수온약층이 우세하며, 하천형 댐호에서는 혼합층이 우세한 것으로 분석되었다.

6. 결론

1994년에서 2004년까지 한강수계 호수들에 대한 29개 Landsat 위성관측수온과, 매월 1회 실측한 표층 및 상층수온 자료를 위성측정일로 보간하여 얻은 실측보간수온은, 소양호에서는 0.915, 파로호, 춘천호, 의암호, 청평호, 팔당호에서는 0.951-0.980 이상의 상관계수를 나타냈다. 총 29개의 영상 중에서 수온오차의 표준편차가 2.0°C 이하인 24개 영상에 대하여 통계적인 대기보정을 한 결과, 호수별 상관계수는 소양호에서는 0.950, 다른 호수에서는 0.970-0.997로 높은 상관성을 보여주었다.

소양호에서 4-7월 위성관측수온이 실측보간수온보다 더 높게 나타나는 이상 수온오차 현상은, 실측수온이 수심 10m에서 얻어진 것에 기인한다. 이로서 소양호 상층수에서 4-7월에 혼합층이 잘 발달하지 않으며 수온약층이 표면부터 잘 발달하는 성층현상을 관측할 수 있었다. 하천형 댐호에서는 연중 일정한 유입량과 방류량, 얇은 수심의 영향으로 상층수에 혼합층이 항상 발달되어 있음이 확인되었다.

본 연구는 시계열 인공위성 관측과 제한된 현장 실측

자료를 이용하여 호수 상층부의 성층현상에 대한 계절적인 변화를 해석함으로써 인공위성을 이용한 호소학적 접근을 시도하였으며, 이를 다른 수계로 확대 연구하여 비교 분석해 볼 가치가 있다.

사 사

Landsat 영상을 제공해주신 한국전자통신연구원과 한국지질자원연구원, 수온자료를 제공해주신 환경부 수질정책과 이지영님과 한국수자원공사 소양강댐관리단 환경과에 감사를 드린다.

참고문헌

- 김종민, 박준대, 노혜란, 한명수, 2002. 소양호와 팔당호 수질의 수직 및 계절적 변화, *Korean Journal of Limnology*, 35(1): 10-20.
- 이종범, 1989. 소양호의 수온 수직분포에 관한 열수지적 연구, *Korean Journal of Limnology*, 22(1): 29-41.
- 정종철, 유신재, 1999. Landsat TM을 이용한 표층수온 분석 오차, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 15(1): 1-8.
- Chander, G. and B. Markham, 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-calibration Dynamic Ranges, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11): 2674-2677.
- Tassan, S. and M. Ribera d'Alcala, 1993. Water Quality Monitoring by TM in Coastal Environments- A performance Analysis of local bio-optical Algorithms and Atmospheric Correction Procedures, *Remote Sensing Environment*, 45: 177-191.
- Horne, A. J. and C. R. Goldman, 1994. *Limnology*, 2nd ed., McGraw-Hill, Inc.