

이훈열 교수 지도
이학학사학위논문

Terra MODIS를 이용한 Landsat
해수면온도 보정

김 준 수

강원대학교

지구과학부 지구물리학 전공

2007년 2월

목 차

List of Figure	ii
List of Table	iv
1. 서론	1
2. 기초 이론	
2-1. Landsat	2
2-2. Terra MODIS	4
3. 연구지역	8
4. 자료획득 및 자료처리	
4-1. 실측수온자료 및 위성자료	10
4-2. 자료처리	
4-2-1. Landsat-7 + ETM	11
4-2-2. Terra MODIS	17
4-3. 상관도 분석	22
5. 결론	27
참고문헌	28

List of Figure

Fig 1.	The study area is the three frames of Landsat data overlying Terra/MODIS images. The dots indicate the locations of coastal stationary observation posts	8
Fig 2.	Landsat 7 Image (PATH-ROW 115-034) 2000.09.29	14
Fig 3.	Landsat 7 Image (PATH-ROW 116-034) 2001.09.23	15
Fig 4.	Landsat 7 Image (PATH-ROW 116-035) 2004.04.24	16
Fig 5.	Relationship between Landsat SST and in-situ temperature before the atmospheric correction	17
Fig 6.	Schematic diagram of the responses of brightness temperature to atmospheric absorption.	18
Fig 7.	Relationship between $M_BT31(T_{31})$ and $M_SST(T_{MODIS})$	20
Fig 8.	Atmospheric Effect by different Shooting time;Landsat-7(left),Terra MODIS(right) 2000.06.11	23
Fig 9.	Relationship between Landsat and MODIS BT31before the atmospheric correction	25

Fig 10. Relationship between Landsat SST and MODIS SST before the atmospheric correction 26

Fig 11. Relationship between Landsat SST and in-situ temperature after the atmospheric correction 26

List of Table

Table 1.	The wavelength and spatial resolution of Landsat-7 ETM+	4
Table 2.	The wavelength and spatial resolution of Terra MODIS	6
Table 3.	MODIS Data Product Description used in this study	7
Table 4.	Location Coordinates of Study area	9
Table 5.	The Landsat (TM or ETM+) and Terra MODIS dataset	10
Table 6.	Landsat-7 ETM+ Spectral Radiance Range	12
Table 7.	Thermal Band Calibration Constant	13
Table 8.	MODIS SST Calibration Constant	19
Table 9.	Landsat TM/ETM+, Terra MODIS and in situ SST ($^{\circ}C$)	24

1. 서론

원격탐사(Remote sensing)는 멀리 떨어져 있는 대상물을 관측하는 기술로써 빛이나 열, 라디오 등과 같은 전자기파를 이용하여 대상 체와 직접적으로 접촉하지 않고 대상 체에 대한 정보를 추출할 수 있다. 원격탐사의 장점은 빠른 시간 내에 적은 비용과 인력을 투입하여 관련 분야의 제반 정보를 효율적으로 수집하여 제작하고 공간자료의 가공 및 분석기능을 통하여 원하는 정보를 경제적이고 효과적으로 획득할 수 있다는 것이다. 그 이외에도 넓은 지역의 자료를 한 번에 취득할 수 있으며 접근이 불가능한 지역의 자료 수집이 가능하고 동일한 지역의 정보를 주기적으로 수집할 수 있으며 육안관측이 불가능한 자료를 광학적/전자적 센서를 사용하여 수집할 수 있다. 최근 원격탐사 기술은 지도 제작, 자원 탐사, 기상 관측, 환경 감시, 재해 방재 등으로부터 군사적인 관측에 이르기까지 다양한 분야에 대한 작업이 수행되어지고 있다(<http://krsc.kordi.re.kr>).

지구의 표면을 관측하는 인공위성 센서는 지표에서 반사 혹은 방사되는 전자기파를 감지하며 센서에 감지되는 전자기파 중 지구 복사 에너지만을 감지할 수 있다면 정확한 지구의 표면온도 측정이 가능해진다. 그러나 낮에는 육지의 대부분이 지구 복사 에너지를 방출함과 동시에 태양 복사 에너지도 반사하기 때문에 위성으로부터 정확한 표면온도를 측정하기가 불가능하다. 그러나 강이나 호수, 바다 등 액체 상태의 물은 열적외선 파장에서 흑체에 가까운 성질을 나타낸다. 열적외선 파장에서 물은 입사하는 열적외선 영역의 태양 복사 에너지를 모두 흡수하고 지구 복사 에너지를 전부 방출한다. 따라서 액체인 물의 온도를 관측하는데 있어서 인공위성의 열적외선 센서가 매우 유용하게 이용되고 있다.

위성자료를 이용한 해수면온도 산출은 buoy나 선박에 의한 직접 관측에 비해 광범위한 영역에 대하여 단일의 관측 장비에 의해 제공된다. 하지만 위성관측 자료의 이용에 있어 구름 효과와 대기효과에 대한 고려는 필수적이다. 일반적으로 구름은 해수면온도에 비해 상당히 낮은 온도를 갖기 때문에, 일정 FOV(Field of View)에 약간의 구름이 존재할 경우 상당한 오차가 포함될 수 있다. 특히 수증기가 존재할 경우 대기에 의한 복사에너지의 감쇄효과로 인하여 해수면온도가 낮은 값으로 계산되어진다(한향선, 2005).

적도 통과시각이 지방시로 10시 ~ 10시 30분에 촬영되는 Landsat ETM+ 열적외선 영상은 60 m의 공간적인 해상력을 가지기 때문에 규모가 크지 않은 연안지역이나 내륙의 하천 및 호수에서의 표면온도 분석에 유용하다. 그러나 열적외선 영역의 밴드가 하나이기 때문에 자체적인 대기보정이 불가능하여 정확한 해수면온도를 산출하기 어렵다. 본 논문에서는 Landsat-7 ETM+의 열적외선 영상을 이용하여 동해안과 서해안의 연안지역에 대해 NASA 경험식을 통한 표면수온을 산출하였고, 자체적인 대기보정이 가능하고 Landsat-7위성과 같은 고도와 궤도를 30분 뒤에 촬영하는 Terra MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer)를 이용하여 Landsat의 대기보정을 시도 하고 실측수온과의 비교를 통해 변화를 알아보았다.

2. 기초 이론

2-1. Landsat

Landsat Project는 미국지질조사소(United States Geological Survey, USGS)와 NASA가 인공위성을 이용하여 지구 자원의 데이터를 얻기 위해 공동 계획, 발의한 것으로 Landsat 위성 시리즈를 사용하고 있다. 지구를 관측하기 위해 발사된 위성 프로그램들 중에 가장 오래된 프로그램이며, NASA는 우주선의 개발과 발사를 담당하고 USGS는 비행 조작, 운용 및 유지, 그리고 모든 지표 데이터의 수신과 자료 처리, 자료 보관, 결과 산출 및 배포를 담당한다.

Landsat Project의 주요한 목적은 안정된 지구 관측 자료의 수집이다. Landsat 시리즈는 Landsat-1이 발사된 이래 Landsat-2, 3, 4, 5가 차례로 발사되었으며 Landsat-6은 발사 직후 궤도 진입에 실패하였다. 현재 Landsat-7까지 발사되어 Landsat-5, Landsat-7이 운용 중에 있다.

Landsat-1은 Landsat Project의 첫 번째로 발사된 최초의 민간목적 지구 관측 위성으로써, 1972년 발사되어 1978년 1월까지 지구를 관측하였다. Landsat-2는 1975년 1월 22일, Landsat-3는 1978년 3월 5일 각각 발사되었다. Landsat-3는

233m의 해상도를 가진 MSS 열적외선 밴드를 사용하여 Landsat 위성 시리즈 중 가장 먼저 지구의 온도를 관측하기 시작하였다. Landsat-4와 Landsat-5는 각각 1982년 7월 16일, 1984년 3월1일 발사되어 Landsat-5는 현재까지 지구를 관측하고 있다. Landsat-5의 열적외선 밴드에서는 120m의 해상도를 가지는 Thematic Mapper(TM)센서를 사용한다. Landsat-7은 Enhanced Thematic Mapper Plus(ETM+) 센서를 사용하며, 1999년 4월 15일 발사되어 현재까지 지구를 관측하고 있다(한향선, 2005).

이 논문에 사용된 Landsat 7위성의 ETM+ 센서에는 15m 해상도의 panchromatic 밴드와 28.5m 해상도의 multi-spectral 밴드가 있으며 60m의 열적외선 밴드도 포함한다. Table 1 은 Landsat-7 ETM+ 의 밴드 별 파장과 공간적인 해상력을 나타낸다. Landsat-7의 궤도는 태양동기궤도이며 궤도 경사각은 98.2° 이다. 지상에서 705km의 고도에서 98.9분마다 지구를 일주하며 16일을 주기로 전 지구를 촬영한다. Landsat-7 ETM+ 의 열적외선 밴드는 지구 표면의 온도를 직접적으로 측정할 수 있다. 그러나 태양 복사 에너지와 지구 복사 에너지를 동시에 측정하게 되는 Landsat 열적외선 밴드의 지구 표면 촬영은 주로 주간에 이루어지기 때문에 육지와 같은 지구 표면의 정확한 온도 관측이 사실상 불가능하다. 하지만 바다나 호수와 같은 액체 상태의 물은 모든 열적외선 에너지를 완전히 흡수하고 지구 복사 열적외선 에너지만을 방출하는 흑체에 가까운 성질을 나타내기 때문에 Landsat-7 ETM+ 의 공간적인 해상력의 장점을 고려하여 연안지역의 해수면온도나 내륙의 강, 호수의 표면 수온 분석이 가능해진다. 하지만 1개의 열적외선영역의 밴드로 자체적인 대기보정이 어렵다는 단점이 있다.

Table 1. The wavelength and spatial resolution of Landsat-7 ETM+.

Landsat-7 ETM+		
Band Number	Wavelength(μm)	Resolution(m)
1	0.45-0.52	30
2	0.53-0.61	30
3	0.63-0.69	30
4	0.78-0.90	30
5	1.55-1.75	30
6	10.40-12.50	60
7	2.09-2.35	30
8	0.52-0.90	15

2-2. Terra MODIS

Terra(EOS AM-1)위성은 1999년 12월 19일 미국 Vandenberg 공군기지에서 발사되었다. 705km 고도에서 일 2회(오전·오후 11시 경) 한반도 상공 통과하는 관측범위 남북방향 5000 km, 동서방향 2300 km의 극궤도 위성이다. 미국 NASA에서 추진하는 위성을 이용한 지구 전역의 장기관측 계획(EOS)에 의해 발사되었다. Terra 위성은 구름과 Aerosol이 지구 복사 평형에 미치는 영향 연구, 육상생물권 내에서의 탄소, 물, 에너지의 감소의 근원 탐색, 육상생태계의 역학과 기후와의 연결고리 검색, 해수면 온도와 해양 일차생산력 연구, 대류권의 CH 와 CH_4 의 농도, 그리고 화산학과 지질학에 관한 이해증진을 목적으로 장기간 지속적으로 지구의 환경을 관측하는데 목적을 두고 있다(<http://web.kma.go.kr>).

Terra 위성에 탑재된 다섯 개의 센서 중 하나인 MODIS(MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) 고분해능 기상센서는 36개의 채널로 구성되며 MODIS센서는 지구 생물권의 dynamics에 근거한 자료를 제공하는 Terra의 주 센서로서 해양과 육상, 대기 모두에 대해 적용이 가능한 다목적 센서이다. MODIS 센

서는 Table 4에서 나타내듯이 36개의 spectral bands와 0.25 ~ 1km의 해상도로 육상과 해양의 표면 온도, 기초 생산력, 육상 표면, 구름, 에어로졸, 수증기량, 온도 profiles등 지구 전체를 하루나 이틀사이에 모두 관측할 수 있다 (<http://krsc.kari.re.kr>). Table 2 는 MODIS 센서의 각 밴드별 과장의 범위와 각 밴드들이 기본적으로 사용되는 분야에 대하여 나타낸 것이다.

또한 MODIS 데이터는 기존의 NOAA나 GMS에 비해 고해상도 정보를 제공함으로써 대기, 해양, 육지에 대한 구름, 에어로졸, 수증기 등의 특성 분석, 대기권의 태양/지구 복사에너지 관측을 통한 지구온난화 및 기후변화 감시, 대기의 연직관측 및 해상과 육상에서의 생물간의 상호관계 관측 등 다양한 분야에 유용하게 활용된다. 이러한 MODIS 데이터의 여러 관측 분야를 각 분야별로 데이터화하여 보다 편리한 자료처리와 연구를 위해 NASA에서는 이 Terra MODIS의 분야를 크게 네 개 테마로 분류, 제공하고 있다. MODIS 센서의 각 밴드의 영역이 목표로 하는 특징을 촬영하여 송신하면 이것을 NASA에서 수신하여 데이터를 분류하고 계산하여 제공하고 있다(Table 3). 따라서 필요한 데이터는 NASA 산하의 MODIS 데이터 센터를 통해 직접 받을 수 있다(<http://gsfc.nasa.gov/data>, <http://eos.nasa.gov/>).

Table 2. The wavelength and spatial resolution of Terra MODIS
 (회색으로 표시된 31번과 32번 밴드는 Terra MODIS에서 열적외선 영역의 밴드)

Primary Use	Band	Bandwidth (μm)	Spectral Radiance	Resolution (m)
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	620–670	21.8	250
	2	841–876	24.7	
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	459–479	35.3	500
	4	545–565	29.0	
	5	1230–1250	5.4	
	6	1628–1652	7.3	
	7	2105–2155	1.0	
Ocean Color Phytoplankton Biogeochemistry	8	405–420	44.9	1000
	9	438–448	41.9	
	10	483–493	32.1	
	11	526–536	27.9	
	12	546–556	21.0	
	13	662–672	9.5	
	14	673–683	8.7	
	15	743–753	10.2	
Atmospheric Water Vapor	16	862–877	6.2	
	17	890–920	10.0	
	18	931–941	3.6	
Surface/Cloud Temperature	19	915–965	15.0	
	20	3.660–3.840	0.45 (300 K)	
	21	3.929–3.989	2.38 (335 K)	
	22	3.929–3.989	0.67 (300 K)	
Atmospheric Temperature	23	4.020–4.080	0.79 (300 K)	
	24	4.433–4.498	0.17 (250 K)	
Cirrus Clouds Water Vapor	25	4.482–4.549	0.59 (275 K)	
	26	1.360–1.390	6.0	
	27	6.535–6.895	1.16 (240 K)	
Cloud Properties	28	7.175–7.475	2.18 (250 K)	
	29	8.400–8.700	9.58 (300 K)	
Ozone	30	9.580–9.880	3.69 (250 K)	
Surface/Cloud Temperature	31	10.780–11.280	9.55 (300 K)	
	32	11.770–12.270	8.94 (300 K)	
Cloud Top Attitude	33	13.185–13.485	4.52 (260 K)	
	34	13.485–13.785	3.76 (250 K)	
	35	13.785–14.085	3.11 (240 K)	
	36	14.085–14.385	2.08 (220 K)	

Table 3 MODIS Data Product Description used in this study

MODIS/Terra Data Product		Data Product Description
Level 1B Data Product	MOD021KM	<p>MODIS/Terra Calibrated Radiances 5-Min L1B Swath 1km</p> <p>This Level 1B collection contains calibrated and geolocated radiances at-aperture for all 36 MODIS spectral bands at 1km resolution. (Channel Subset Available)</p>
	MOD03	<p>MODIS/Terra Geolocation Fields 5-Min L1A Swath 1km</p> <p>Geolocation collection contains geodetic latitude and longitude, surface height above geoid, solar zenith and azimuth angles, satellite zenith and azimuth angles, and a land/sea mask for each 1km sample.</p>
Level 2 Data Product	MOD28L2	<p>MODIS/Terra Sea Surface Temperature Products 5-Min L2 Swath 1km</p> <p>This MODIS Level 2 Sea Surface Temperature Product, MOD28L2, product provides a long wavelength (11-12um, SST) sea surface temperature and a short wavelength sea surface temperature (3-4um, SST4) at 1-km resolution over the global oceans. Day and night retrievals are provided as separate products for both SST and SST4 (Parameter Subset available)</p>

3. 연구지역

이 논문의 연구지역은 실측수온을 동해안 연안정지관측점 세 지점(속초, 주문진, 묵호)과 서해안 연안정지관측점 여섯 지점(선미도, 부도, 목덕도, 어청도, 군산, 말도)으로 설정하였다(Fig. 1). 1910년부터 한국근해의 40개 연안정지 관측점(등대)에서 매일 1회(오전 10시) 관측한 수온, 기온 및 기상자료가 수록되어 있는 연안정지 해양관측 자료를 바탕으로 2000년에서 2004년 8월까지 측정된 자료 중에서 Landsat-7 영상의 날짜와 맞는 실측수온의 자료를 사용하였다. 각 연안정지관측점은 일정한 좌표(Table 4)를 정하여 측정하므로 위성 영상에서 산출한 해수면온도를 실측수온과 비교할 수 있는 기준이 되었다.

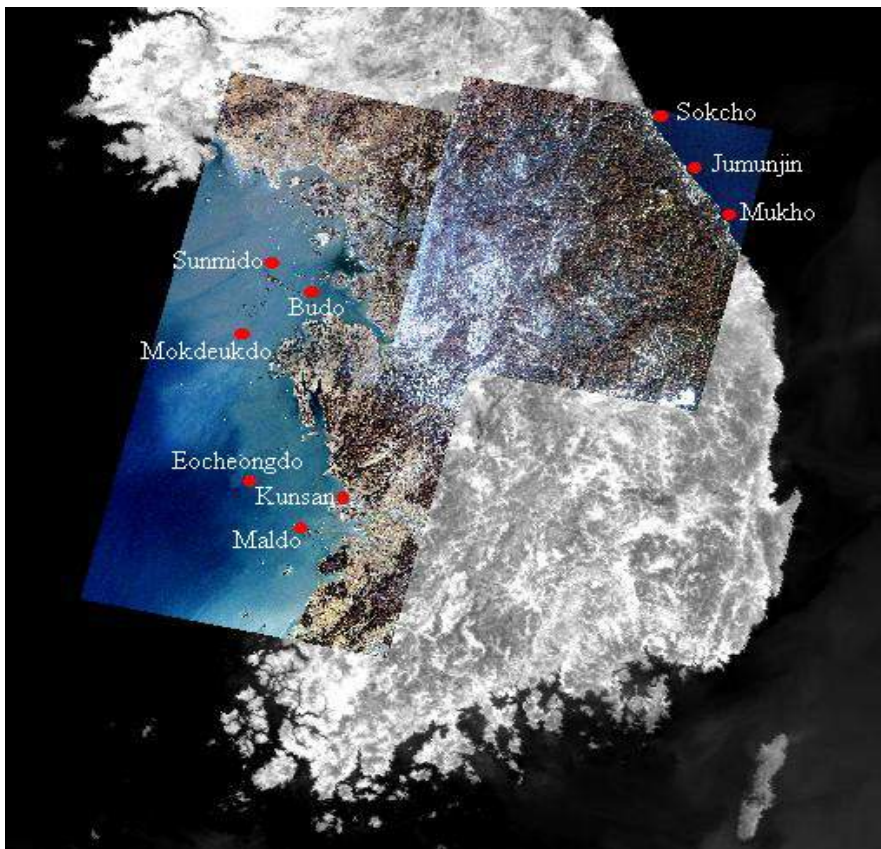


Fig 1. The study area is the three frames of Landsat data overlying Terra/MODIS images. The dots indicate the locations of coastal stationary observation post

Table 4 Location Coordinates of Study area

Station	Lat. (N)	Long. (E)
Sokcho	38 ° 12' 32"	128 ° 36' 18"
Jumunjin	37 ° 53' 15"	128 ° 50' 00"
Mukho	37 ° 32' 58"	129 ° 07' 15"
Maldo	35 ° 51' 15"	126 ° 19' 10"
Kunsan	35 ° 59' 15"	126 ° 43' 00"
Eocheongdo	36 ° 06' 40"	125 ° 59' 15"
Mokdeukdo	36 ° 55' 40"	125 ° 45' 30"
Budo	37 ° 08' 40"	126 ° 21' 00"
Sonmido	37 ° 17' 10"	126 ° 04' 45"

Landsat-7의 촬영 시각은 지방 평균시 오전 10시 30분 ~ 11시 사이로 오전 11시에 Landsat과 같은 궤도를 비행하고 있는 Terra MODIS의 250, 500, 1000m의 해상도 자료를 Landsat-7의 30m 자료와 함께 같은 시간대에 얻기 위함이다. Landsat이 촬영한 영상들은 PATH-ROW로 구분되는 scene으로 구성되어 있다. 각각의 영상들은 지상에서 폭 185km × 길이 170km의 범위를 가진다 (landsat.usgs.gov).

Landsat-7 위성의 영상은 Terra 위성이 발사된 1999년 이후부터 2004년까지의 영상들로, 동해안을 포함하고 있는 PATH-ROW 115-034(2개)와 서해안을 포함하는 116-034(7개), 116-035(6개)를 사용하였다.

Terra MODIS 영상은 앞에서 언급했듯이 Landsat 영상보다 30분 늦게 촬영된 영상으로, 보유하고 있는 Landsat 영상과 같은 날짜만을 사용하였다(Table 5). 따라서 관측 및 촬영시간의 순서는 실측수온, Landsat-7, 그리고 Terra MODIS로 각각 30분 정도 시간차이를 보이고 있다.

Table 5. The Landsat-7 ETM+ and Terra MODIS dataset

Acquisition Date	Landsat 7 PATH-ROW	Terra MODIS
2000.04.06	115-034	○
2000.05.08		○
2000.09.29		○
2000.09.04	116-034	○
2001.09.23		○
2004.03.23	116-034,116-035	○
2004.04.24		○
2004.06.11		○
2004.07.29		○
2004.08.30		○
2000.11.23		116-035

4. 자료획득 및 자료처리

4-1. 실측수온자료 및 위성자료

연구지역의 실측수온 자료는 열적외선 영상에서 산출한 해수면온도와 비교를 보다 정확히 하기 위하여 국립수산과학원에서 제공하는 연안정지관측점자료를 사용하였다. 이 자료는 1910년대부터 한국근해의 40개 연안정지 관측점(등대)에서 매일 1회(10시) 수온, 기온 및 기상자료를 측정한 것이다. 그러나 관측점에 따라서 시작 연도가 다르고 도중에 등대의 무인화로 측정이 중단된 곳도 있기 때문에 최대한 위성영상과 같은 연도(2000~2004년)와 위치의 실측수온을 사용하였다. 각각의 지점에서 위성관측수온(Landsat-7)측정 기준은 실측수온의 측정이 이루어진 위치와 최대한 일치하도록 설정하였다. 이러한 과정을 통해 선정된 지역은 동해안 연안정지관측점 세 지점(속초, 주문진, 묵호)과 서해안 연안정지관측점 여섯 지점(선미도, 부

도, 목덕도, 어청도, 군산, 말도)이다. 실측수온은 일정한 좌표를 정해두고 항상 정확히 같은 장소에서 측정되고 있기 때문에 한국해양자료센터에서 밝히는 실측수온 측정 위치를 중심으로 Landsat-7 영상에서 10×10픽셀(300m×300m)로 위성관측 수온의 측정 범위를 설정하였고, Terra MODIS 영상에서는 한 픽셀의 크기가 1km×1km 이므로 연안지역이 포함되지 않은 범위의 한 개의 픽셀 값을 사용하였다. 이와 같이 얻어진 Landsat-7 위성영상은 RATH-ROW 115-034 3개 영상, 116-034 7개 영상 그리고 116-035 6개 영상이며, 이중에 116-034와 116-035의 2004년 영상 중 5개의 영상은 촬영 날짜가 같은 영상이므로 Terra MODIS 영상은 Landsat-7 영상의 날짜를 기준으로 총 11개의 영상을 사용하였다.

Terra MODIS 영상은 NASA에서 제공하는 MOD03 과 MOD021KM, 그리고 MOD28L데이터를 사용하였다. 이 데이터들은 각각의 특징과 연구 분야가 분류되어 있기 때문에(Table. 3) 본 연구에서 사용한 Landsat 7과 같은 날짜의 Terra MODIS 데이터를 각 Product 별로 사용하였다.

4-2. 자료처리

4-2-1. Landsat-7

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* μm)

QCAL = the quantized calibrated pixel value in DN

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

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

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 6는 Landsat-7 ETM+ 의 Spectral Radiance Range이다. 복사휘도를 온도로 전환시켜 주는 방법에는 NASA 경험식과 RESTEC 방법, 그리고 Quadratic 방법이 존재한다. 본 연구에서는, post-calibration에 의한 방법으로 계산치와 실측치 사이에서 높은 상관관계를 보여주는 NASA 경험식을 (정종철과 유신재, 1998) 이용하여 다음과 같이 위성온도(T)를 구하였다.

Table 6. 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

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

T = effective at-satellite temperature in Kelvin;

K_2 = calibration constant 2 in Kelvin;

K_1 = calibration constant 1 in Kelvin;

Table 7. Thermal Band Calibration Constant

Units	W/(m ² * sr * μm)	Kelvin
Constant	K_1	K_2
Landsat-7	666.09	1282.71

Fig 2~4는 Landsat-7영상에서 NASA경험식을 사용하여 온도로 변환된 영상에서 실측수온과 비교를 위해 기준이 된 9개 지역의 좌표를 포함하는 범위로 10×10 Pixel로 나타내어 범위내의 해수면온도의 평균을 산출하는 과정을 보여주는 영상이다.

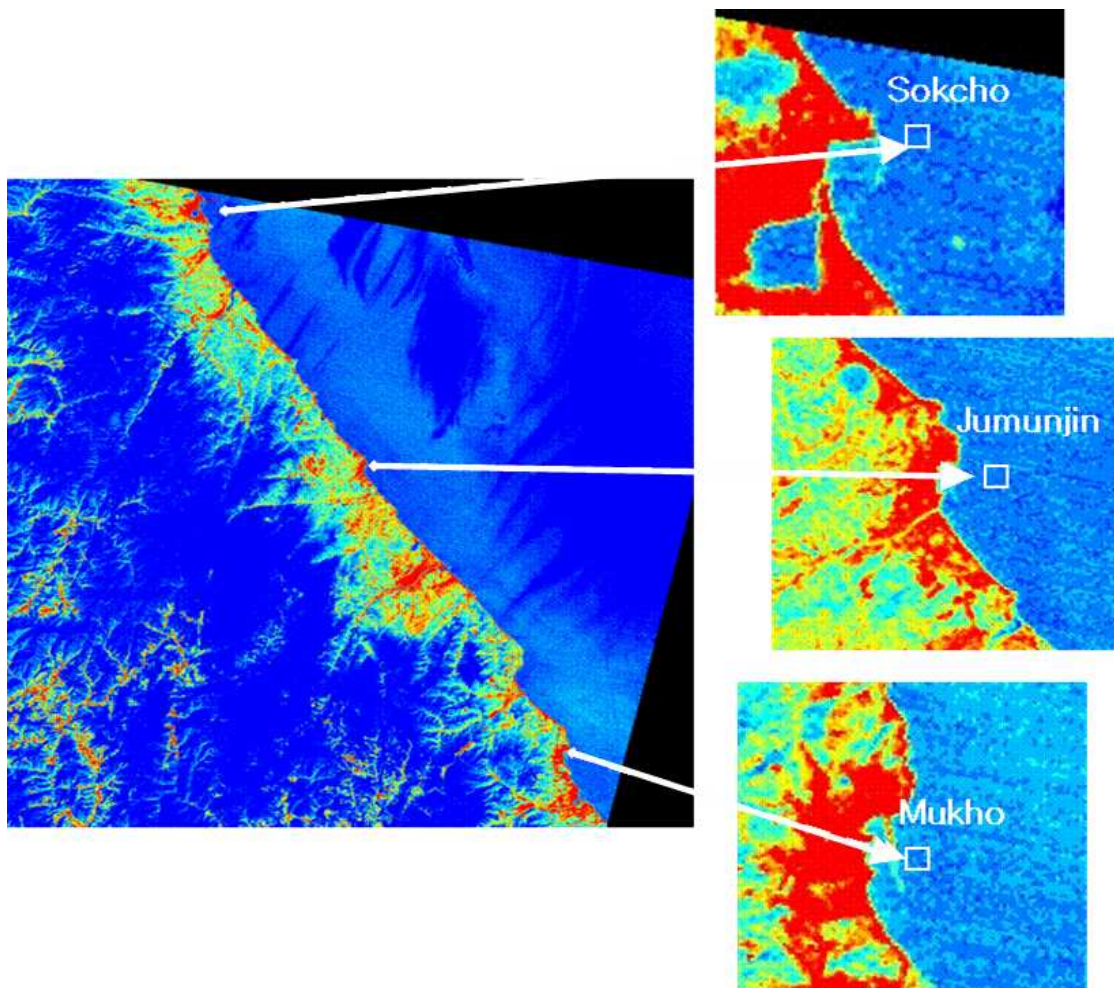


Fig. 2 Landsat 7 Image (PATH-ROW 115-034) 2000.09.29

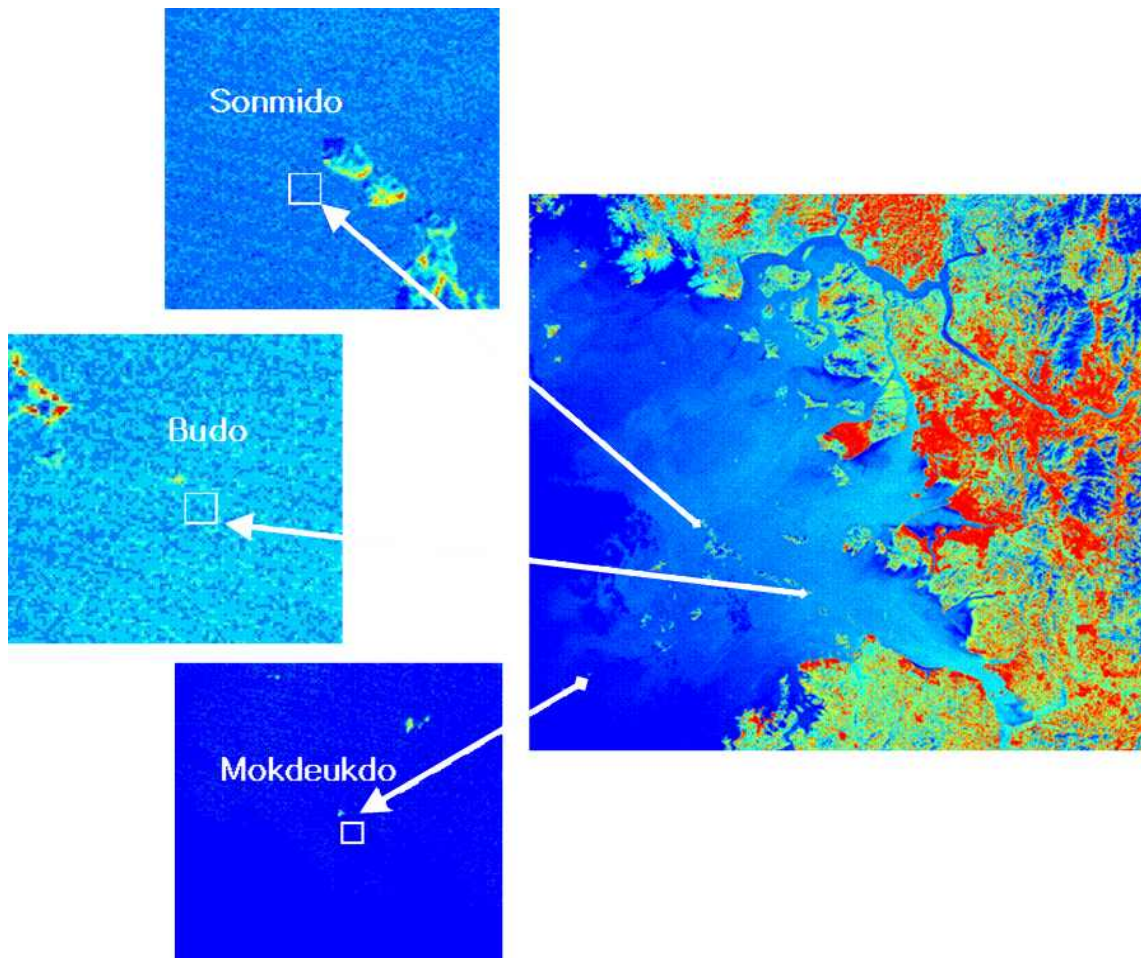


Fig. 3 Landsat 7 Image (PATH-ROW 116-034) 2001.09.23

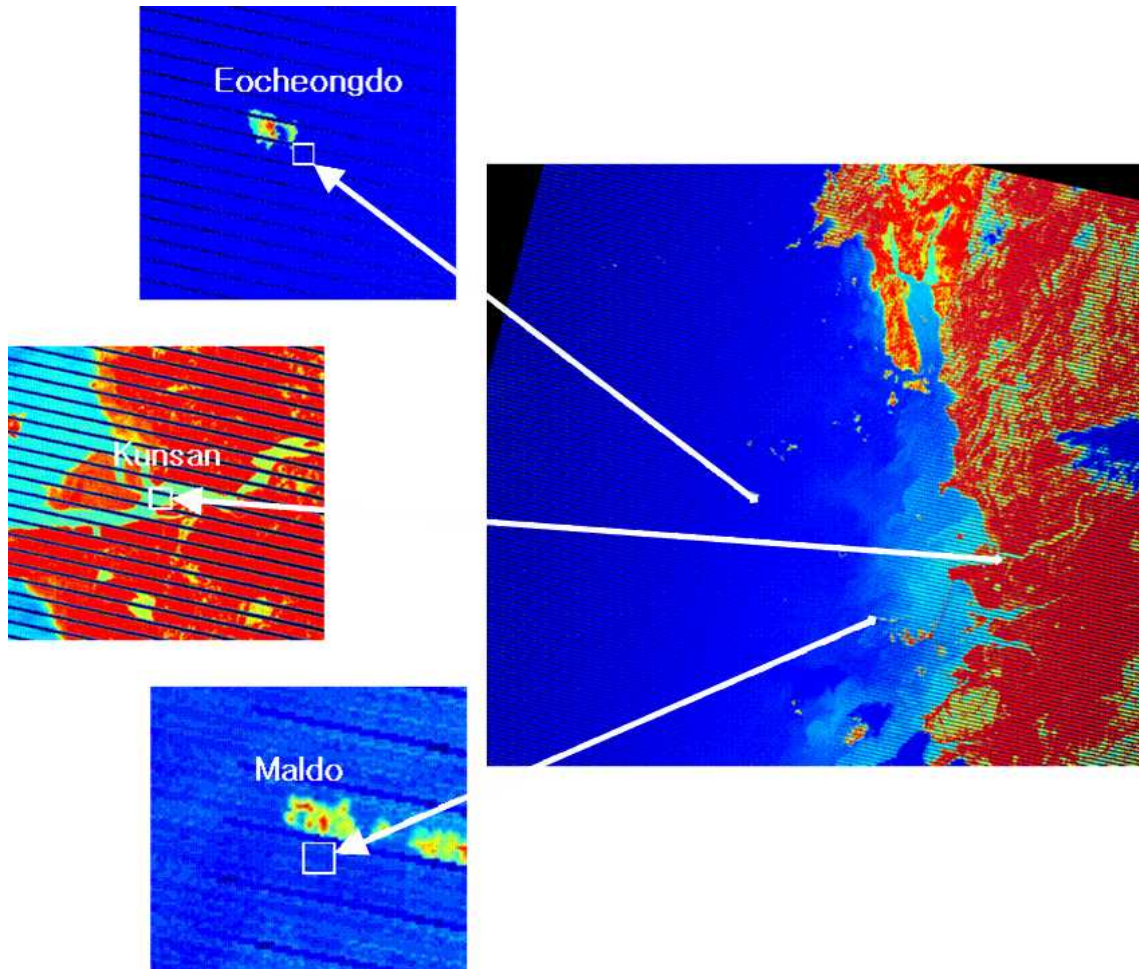


Fig. 4 Landsat 7 Image (PATH-ROW 116-035) 2004.04.24

Fig. 5는 NASA경험식을 바탕으로 Landsat 영상에서 산출한 해수면 온도와 실측 수온을 비교한 것이다. Landsat 영상의 열적외선 센서가 자체대기보정을 할 수 없기 때문에 해수면온도 값을 비교한 결과 실측온도에 비해 전체적으로 낮은 분포로 나타났다. 상관도의 R^2 은 0.6229로 나왔다. 또한 대기효과에 의해 해수면온도가 음수로 나온 지역도 있었다. 이것은 구름이나 안개 등의 대기현상을 Landsat-7 +ETM 센서가 보정을 할 수가 없다는 것을 보여준다. Landsat 영상에서 추출한 해수면온도 중 음수로 나온 것은 상관도에서 제외 시켰다.

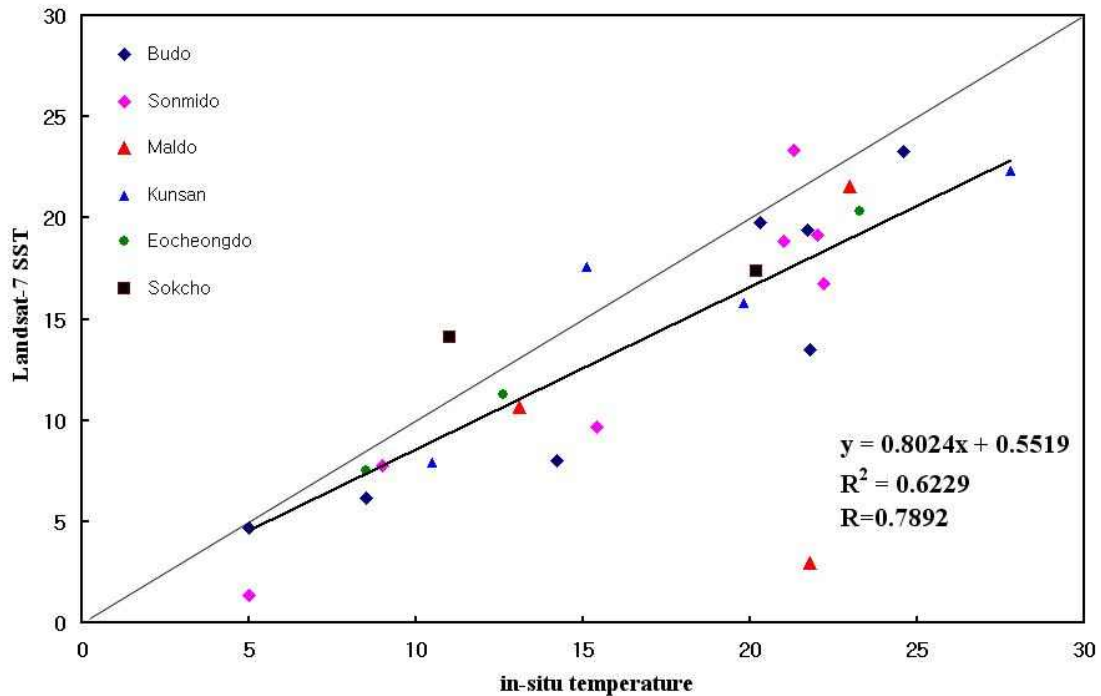


Fig. 5. Relationship between Landsat SST and in-situ temperature before the atmospheric correction

4-2-2. Terra MODIS

MODIS의 두 개의 열적외선 밴드는 각각 $10.78 - 11.28\mu\text{m}$ (Band 31)와 $11.77 - 12.27\mu\text{m}$ (Band 32)의 파장대를 가지고 있다.

위성에서 관측한 적외선 영역에서의 밝기온도를 이용한 해수면온도 산출은 $11\mu\text{m}$ 부근의 파장대에서 수증기에 의한 영향을 가장 적게 받는다는 성질에 그 기본을 두고 있으며, 약한 수증기 효과는 $11\mu\text{m}$ 에서의 밝기온도와 근접해 있는 $12\mu\text{m}$ 부근에서 관측한 밝기온도 값과의 차이를 이용하면 대기보정 할 수 있다는 원리에 근거를 둔다(정주용, 2002).

하지만 Landsat의 열적외선 밴드영역은 $10.4 - 12.5\mu\text{m}$ 로 MODIS 밴드31과

MODIS 밴드32의 파장대를 모두 포함하고 있다. 이것은 수증기와 같은 대기효과를 적게 받는 MODIS 31번 밴드와 대기효과의 영향을 받는 MODIS 32번 밴드의 사이에 Landsat의 온도가 분포하게 될 것으로 추측된다. Fig. 7은 대기효과에 의한 온도감쇄를 나타냈다.

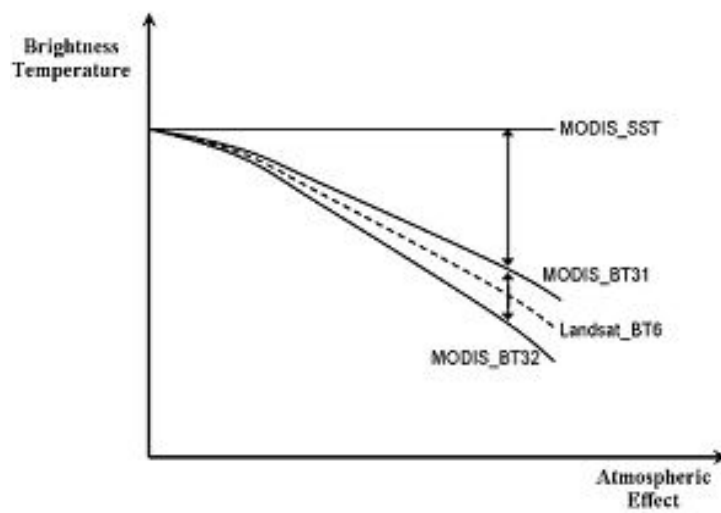


Fig 6. Schematic diagram of the responses of brightness temperature to atmospheric absorption. Note MODIS band 32 suffers more than 31, while Landsat thermal bands lies in between.

앞에서 언급한 대기보정의 원리에 의해 대기효과가 증가할수록 T_{32} 값이 T_{31} 보다 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 대기효과가 심하지 않을 때엔 두 밴드의 차이가 거의 없다. 이 논문에서는 대기효과의 영향을 적게 받는 MODIS 밴드31의 밝기온도와 MODIS SST와의 차이를 대기보정 값으로 하여 Landsat의 대기보정에 사용하였다.

Terra MODIS의 대기보정 값을 알기위해 MODIS Sea Surface Temperature(SST)와 MODIS 밝기온도(BT)의 두 식에 의한 차이 값을 구하고자 아래와 같은 순서로 공식을 유도하였다.

Terra MODIS 해수면온도(SST)산출 식은 아래와 같다(Brown and Minnett, 1999).

$$T_{MODIS} = a_1 + a_2 T_{31} + a_3 \times (T_{31} - T_{32}) \times B_{SST} + a_4 \times (T_{31} - T_{32}) \times (\sec\theta - 1) \quad (3)$$

Table. 8 MODIS SST Calibration Contant

a_1	a_2	a_3	a_4	$T_{31} - T_{32}$
1.0520	0.984	0.130	1.860	≤ 0.7
1.8860	0.938	0.128	1.094	> 0.7

- $(T_{31} - T_{32}) = \text{avg}(T_{31}) - \text{avg}(T_{32})$ for a 3*3 pixel box. Only "cloud" free pixels with in the box are considered in the average.
- θ is the satellite zenith angle.
- B_{SST} is baseline SST, which is either SST4 or Reference SST, where SSTref is operationally derived from the Reynolds SST value.

여기서 T_{31} 과 T_{32} 는 MODIS 31과 32번 밴드의 밝기온도(BT)이다. 식(4)는 BT를 구하기 위한 Planck function으로 31번 밴드의 BT를 구하기 위해 사용하였다 (John T. Houghton, 2001).

$$BT = c2 / [\text{wavelength} \times \ln(c1 / \text{wavelength}^5 \times \text{radiance}) + 1] \quad (4)$$

$$c1 = 1.1911 \times 10^{+8} \text{ WM}^{-2} \text{ sr}^{-1} (\mu\text{m}^{-1})^{-4}$$

$$c2 = 1.439 \times 10^{+4} \text{ K}\mu\text{m}$$

이렇게 구하여진 두 데이터(T_{31} 과 T_{MODIS})의 상관관계를 알아보기 위해 상관도를 만들어 T_{MODIS} 와 T_{31} 를 비교해 보았다(Fig. 7).

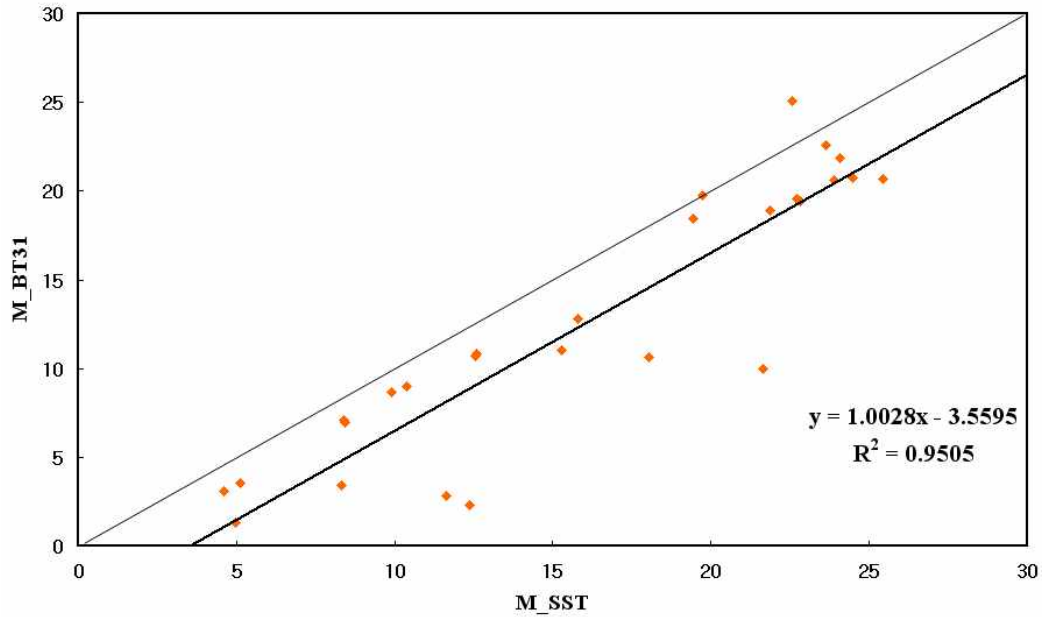


Fig. 7 Relationship between M_BT31(T_{31}) and M_SST(T_{MODIS})

Fig. 7에서 보듯이 전체적으로 M_BT31가 M_BT31M_SST보다 낮게 나타나고 있다. 이것은 M_SST가 대기현상에 의한 온도하강을 보정하고 있다는 것을 확인시켜 주었다. 따라서 Landsat SST(T_{L_atm})을 구하기 위해 MODIS SST와 MODIS Band 31 BT의 차이로서 ΔT (대기보정 값)을 구하였다. 즉, ΔT 을 구하기 위해 대기보정을 한 MODIS SST에서 MODIS Band 31의 BT를 아래와 같이 빼주었다.

$$\Delta T = T_{MODIS} - T_{31} \quad (5)$$

이렇게 계산된 대기보정 값 ΔT 를 NASA 경험식에 의해 산출한 Landsat SST에 더해 줌으로써 대기보정 후 Landsat SST(T_{L_atm})가 되었다.

$$T_{L_atm} = T_L + \Delta T \quad (6)$$

이로써 60m 해상도의 Landsat-7 SST자료에 1km 해상도 대기보정을 MODIS 자료를 이용하여 가능하게 해 주었다.

4-3. 상관도 분석

자료처리 과정에서 Landsat-7 SST, Terra MODIS Band31 BT, 그리고 Terra MODIS SST를 산출하였다. 그리고 각각의 위성 영상에서 산출된 해수면 온도와 실측수온이 얼마만큼의 차이를 가지고 있는지 그리고 대기보정 전, 후 Landsat의 해수면온도변화를 보기위해 각각의 산출 식에 의해 추출한 온도를 표(Table 9)로 나타내었다.

한편, Table 9에서 회색부분은 MODIS센서에서도 대기보정을 할 수 없는 값이라 판단하고 Landsat SST와 실측수온의 상관도에서 제외시켰다. 두 위성에서 측정된 큰 해수면온도차를 확인하기 위해서 해수면온도의 많은 차이를 보이는 Landsat-7 영상과 Terra MODIS 영상에서의 대기효과의 변화를 알아보았다(Fig. 8). 우선 2004년 06월 11일 Terra MODIS 영상에서 나타난 대기효과를 벡터로 나타내어 같은 날짜의 30분 전 Landsat-7 영상(PATH-ROW 116-034, 116-035)에 비교해 보았다. 그 결과 30분 뒤에 촬영된 Terra MODIS의 영상은 빠른 대기의 이동과 변화(대기효과)에 의해서 해수면온도를 측정하지 못하게 되어 30분 전에 촬영한 Landsat SST와 비교에서 큰 온도차를 보였다.

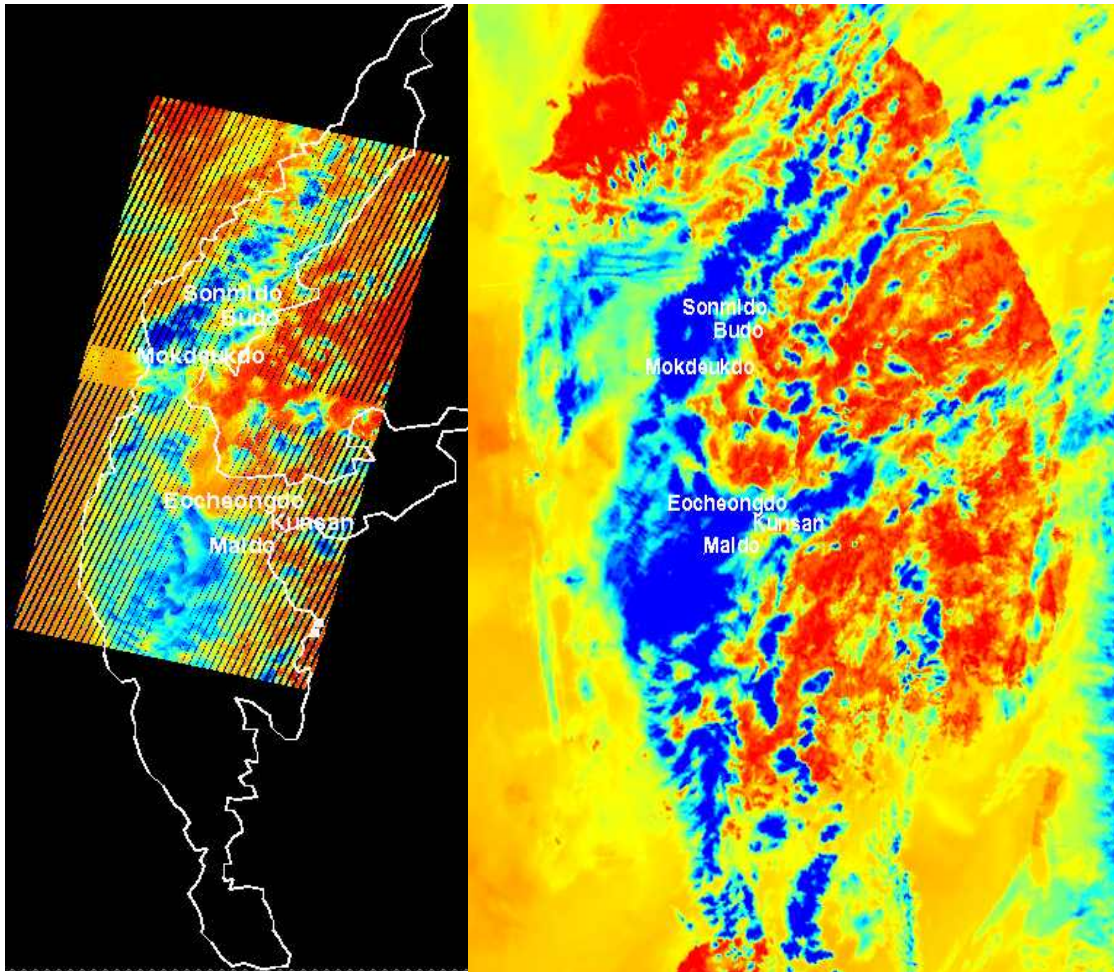


Fig 8. Atmospheric Effect by different Shooting time
Landsat-7(left), Terra MODIS(right) 2000.06.11

Table 9. Landsat TM/ETM+, Terra MODIS and in situ SST (° C)
 (회색으로 표시된 부분은 대기효과로 인해 산출결과가 음수로 나와 제외시킴)

DATE	In-situ coastal observation posts	T _{Landsat}	T ₃₁	T _{MODIS}	T (=T _{MODIS} - T ₃₁)	T _{Landsat-Atm} (=T _{Landsat} +T)	In situ SST
2000.09.04	Budo	23.27	22.56	23.64	1.08	24.35	24.60
	Sonmido	23.32	21.86	24.07	2.21	25.54	21.30
2001.09.23	Budo	19.39	25.08	22.56	-2.51	16.88	21.70
	Sonmido	19.16	19.74	19.72	-0.02	19.14	22.00
2004.03.23	Budo	4.70	3.52	5.12	1.61	6.31	5.00
	Sonmido	1.33	3.10	4.59	1.49	2.82	5.00
2004.04.24	Budo	6.18	1.33	4.98	3.65	9.83	8.50
	Sonmido	7.77	7.09	8.41	1.32	9.09	9.00
2004.06.11	Budo	8.04	-9.69	-4.12	5.58	13.61	14.20
	Sonmido	9.65	-46.23	-41.93	4.30	13.95	15.40
2004.07.29	Budo	19.75	19.58	22.70	3.13	22.87	20.30
	Sonmido	18.85	19.45	22.84	3.39	22.24	21.00
2004.08.30	Budo	13.49	10.60	18.05	7.45	20.94	21.80
	Sonmido	16.77	9.99	21.65	11.66	28.43	22.20
2000.11.23	Maldo	10.63	10.68	12.55	1.87	12.50	13.10
	Kunsan	7.97	8.98	10.39	1.41	9.39	10.50
	Eocheongdo	11.30	10.84	12.61	1.77	13.07	12.60
2004.03.23	Maldo	-6.96	2.63	4.54	1.90	-5.05	5.70
	Kunsan	-3.86	6.71	9.47	2.76	-1.10	9.80
	Eocheongdo	-1.52	1.47	3.85	2.38	0.86	5.70
2004.06.11	Maldo	-21.15	-31.07	-27.57	3.50	-17.65	15.60
	Kunsan	15.84	3.42	8.33	4.91	20.74	19.80
	Eocheongdo	-15.77	-2.35	1.88	4.23	-11.54	14.20
2004.07.29	Maldo	21.55	20.74	24.49	3.75	25.30	23.00
	Kunsan	22.34	24.60	31.34	6.74	29.09	27.80
	Eocheongdo	20.34	20.70	25.44	4.74	25.08	23.30
2000.05.08	Mukho	13.51	10.51	12.35	1.83	15.35	0.28
	Jumunjin	15.69	12.79	15.78	2.98	18.67	12.90
	Sokcho	14.11	11.00	15.29	4.29	18.40	11.00
2000.09.29	Mukho	17.81	19.19	22.94	3.75	21.56	0.24
	Jumunjin	17.64	20.60	23.88	3.28	20.92	20.80
	Sokcho	17.38	18.88	21.88	3.00	20.38	20.20

Table 8의 자료를 이용하여 대기보정 전, 후의 온도 변화를 비교해 보기 위해 상관도를 만들어 보았다. Fig. 9는 MODIS BT31과 대기보정 전 Landsat의 해수면온도를 상관도로 나타낸 것이다. MODIS BT31의 밝기 온도는 Landsat과 같이 대기효과에 의한 영향을 받기 때문에 두 데이터의 온도차는 크지 않았다. Fig. 10은 MODIS SST와 Landsat의 대기보정 전 온도와의 상관도로 나타낸 것이다. 전체적으로 Landsat의 온도가 MODIS SST보다 낮게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이것은 MODIS SST에 비해 대기보정 전 Landsat SST와 MODISBT31은 보정이 되지 않아 대기효과에 의해 낮은 해수면온도가 산출되는 것을 알 수 있다. 대기보정 된 Landsat SST와 실측수온과의 상관성을 알아본 결과(Fig. 11) 대기보정 전의 Landsat SST(Fig. 6)와는 달리 실측수온에 더 근접에 있는 것을 확인 할 수 있었다. 두 상관도에서 대기보정 전의 R^2 는 0.6229 이고 대기보정 후의 R^2 는 0.7779로 더 높아진 것을 볼 수 있다.

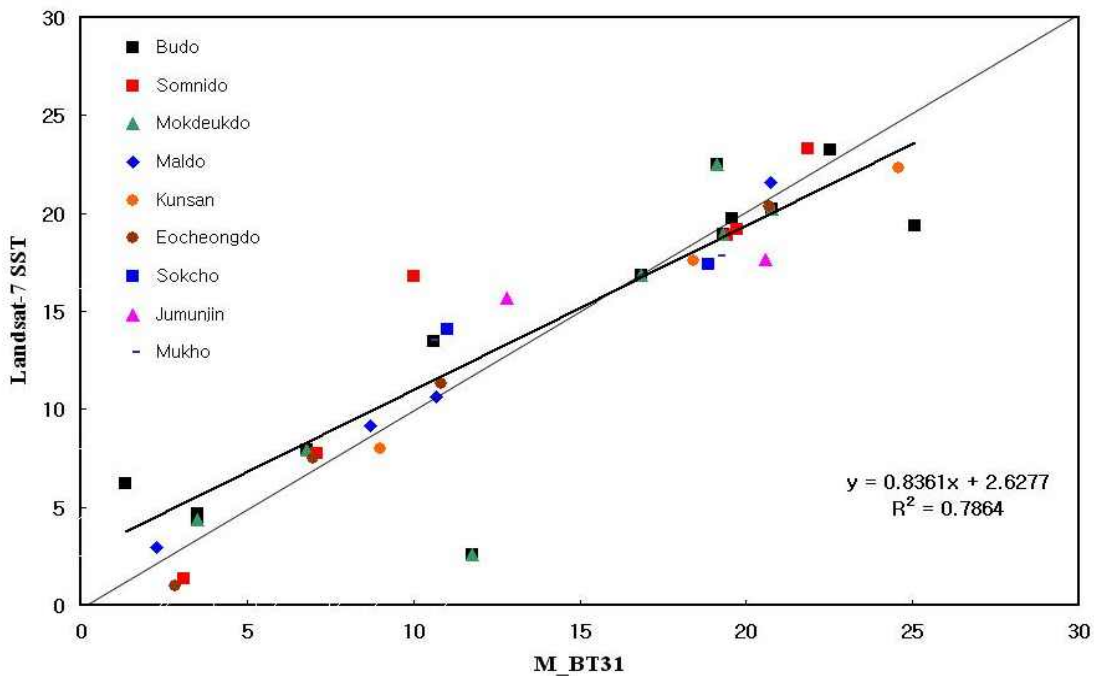


Fig 9. Relationship between Landsat and MODIS BT31 before the atmospheric correction

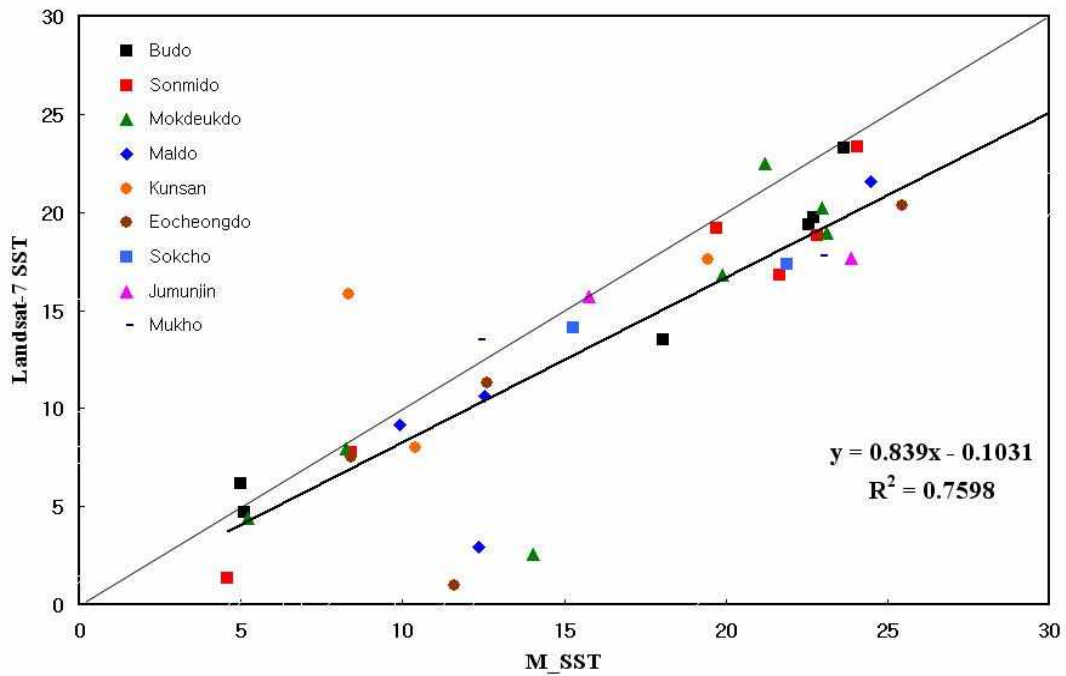


Fig 10. Relationship between Landsat and MODIS SST before the atmospheric correction

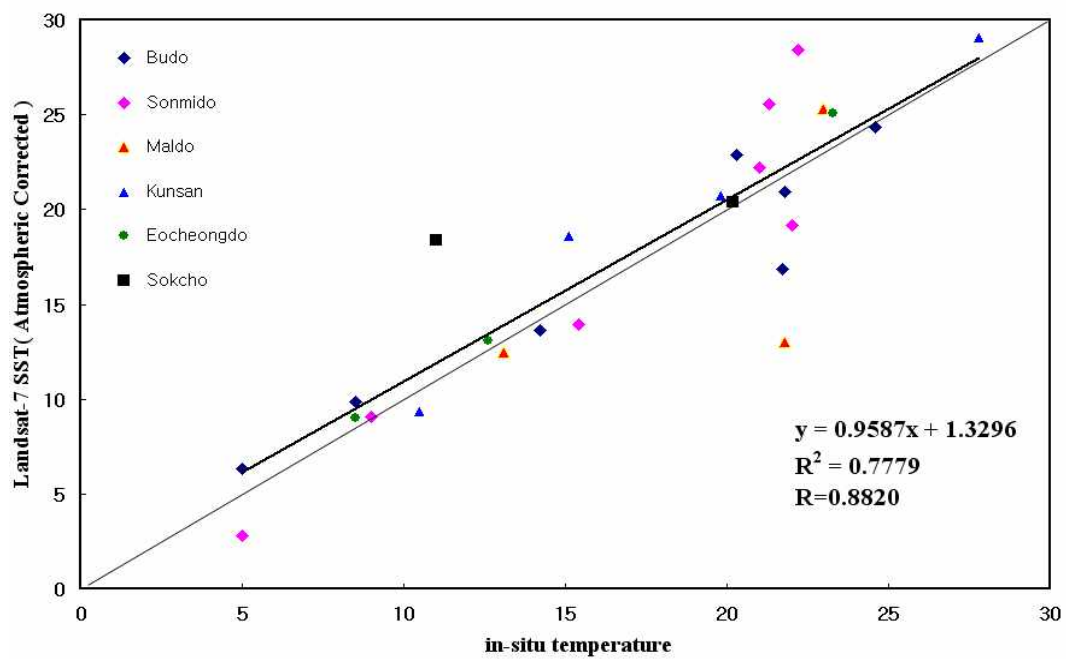


Fig 11. Relationship between Landsat SST and in-situ temperature after the atmospheric correction

5. 결론

실측수온인 연안정지관측점 9지점(동해안 세 지역-속초, 주문진, 묵호와 서해안 여섯 지역-선미도, 부도, 목덕도, 어청도, 군산, 말도)을 기준으로 Landsat SST를 대기보정하기 위해 Terra MODIS의 MOD28L과 MOD021KM의 데이터를 해수면온도 산출 식에 의해 나타내었다. 대기보정 전의 Landsat SST와 실측수온의 R^2 는 0.6229 이었으나 대기보정 후 Landsat SST와 실측수온의 R^2 는 0.7779로 더 높아졌다. 이것은 지금까지 대기효과에 의해 낮게 나타는 Landsat의 SST의 한계를 Terra MODIS를 이용하여 극복시킬 수 있다는 것을 보여준다.

실측수온(연안정지관측점) 또한 측정 위치가 육지와 가까운 곳에서 측정된다. 하지만 두 위성의 영상은 해수면온도만을 추출하기 위해서 육지가 포함되지 않은 픽셀을 선택해야 하므로 수십~수백 미터의 위치오차가 있을 수 있다. 인공위성의 해상도로 정확한 실측수온 지점을 비교한다는 것은 매우 어려운 일이다. 촬영시간 차이에 의한 한계도 보여준다. 두 위성이 촬영시간은 30분의 차이를 두고 있다. 빠른 대기의 이동이 있는 경우 30분 전, 후에 촬영한 두 위성의 대기현상이 다른 것을 관찰하였다.

비록 MODIS를 이용한 Landsat의 대기보정 방법이 한계를 내포하고 있으나, 대기보정 전, 후의 Landsat SST와 실측수온과의 상관성을 볼 때 기존에 비해 많은 보정이 이루어졌고 이에 대한 가능성을 보였다. 이로써 자체 대기보정이 가능한 Terra MODIS를 이용하여 Landsat과 같은 고해상도 위성에서의 대기보정을 한다면 인공위성을 이용한 원격탐사의 활용가치를 더 높일 수 있을 것 이라고 기대한다.

참고문헌

정주용, 안명환, 구자민, 손은하, 2002, "Terra/MODIS 해수면온도 산출 및 검증",
춘계 기상학회

한향선, 2005. "시계열적 Landsat 영상을 이용한 한강 수계 호수의 표면 수온과
성층 현상 분석", 강원대학교 지구물리학과 학사논문

G. Chander and B. Markham, 2003, Revised Landsat-5 TM Radiometric
Calibration Procedures and Post-calibration Dynamic Ranges, *IEEE Trans.
Geosci. Rem. Sens.*, 41(11), 2674-2677.

J. T. Houghton, 2003, *The Physics of Atmospheres*, Cambridge
University Press

O. B. Brown and P. J. Minnett, 1999. MODIS Infrared Sea Surface
Temperature Algorithm - Algorithm Theoretical Basis Document

국립수산과학원 <http://www.nfrda.re.kr>

공공원격탐사 센터 <http://krsc.kordi.re.kr>

기상청-기상 배움터 <http://web.kma.go.kr>

<http://gsfc.nasa.gov/data>

<http://eos.nasa.gov/>