KOMPSAT-2 영상과 IKONOS/GEOEYE-1 영상의 밝기값 상호비교

김혜연* · 김태정*[†] · 이혁**

*인하대학교 영상공학연구소, **국립환경과학원 수질통합관리센터

Brightness Value Comparison Between KOMPSAT-2 Images with IKONOS / GEOEYE-1 Images

Hyeon Kim*, Taejung Kim*[†] and Hyuk Lee**

*Image Engineering lab, Inha University

** Water Quality Control Center, National Institute of Environmental Research

Abstract : Recently, interest in potential for estimating water quality using high resolution satellite images is increasing. However, low SNR(Signal to Noise Ratio) over inland water and radiometric errors such as non-linearity of brightness value of high resolution satellite images often lead to accuracy degradation in water quality estimation. Therefore radiometric correction should be carried out to estimate water quality for high resolution satellite images. For KOMPSAT-2 images parameters for brightness value-radiance conversion are not available and precise radiometric correction is difficult. To exploit KOMPSAT-2 images for water quality monitoring, it is necessary to investigate non-linearity of brightness value and noise over inland water. In this paper, we performed brightness value comparison between KOMPSAT-2 images and IKONOS/GeoEye-1, which are known to show the linearity. We used the images obtained over the same area and on the same date for comparison. As a result, we showed that although KOMPSAT-2 images are more noisy, the trend of brightness value and pattern of noise are almost similar to reference images. The results showed that appropriate target area to minimize the impact of noise was 5×5 . Non-linearity of brightness value between KOMPSAT-2 and reference images was not observed. Therefore we could conclude that KOMPSAT-2 may be used for estimation of water quality parameters such as concentration of chlorophyll.

Key Words : KOMPSAT-2, Water quality monitoring, Brightness value comparison, Non-linearity

요약 : 최근 수질추정을 위한 고해상도 위성영상의 활용 가능성에 대한 관심이 증대되고 있다. 그러나 고해상도 위성영상에서의 수면지역의 낮은 SNR(Signal to Noise Ratio)과 밝기값 비선형성과 같은 방사학적 오차는 수질추정 정확도를 감소시키는 원인이 된다. 이에 따라 위성영상을 이용한 정확한 수질추정을 위해서는 방사학적 보정이 반드시 수행되어야 하나 KOMPSAT-2 위성영상의 경우 밝기값과 입사광량간 변환관계식이 제공되지 않기 때문에 이러한 방사학적 보정에 어려움이 존재한다. 따라서 수질모니터링에 KOMPSAT-2 영상을 활용하기 위해서는 밝기값 비선형성과 내륙 수면지역의 잡음현상을 실험적으로 파악할 필요가 있다. 본 논문에서는 충분한 검보정을 통해 선형성이 보장되고 있는 IKONOS와 GeoEye-1 영상

접수일(2012년 1월 10일), 수정일(1차 : 2012년 2월 24일, 2차 : 3월 24일), 게재확정일(2012년 4월 1일).

[†] 교신저자: 김태정(tezid@inha.ac.kr)

을 기준영상으로 사용하여 동일시기에 동일지역을 촬영한 KOMPSAT-2 영상과의 밝기값 상호비교를 수행하였다. 상호비교 결과, 기준영상에 비해 KOMPSAT-2 영상의 잡음은 다소 높게 나타나나 밝기값의 경향 및 잡음의 크고 작은 패턴은 정확하게 일치하였고 KOMPSAT-2 영상 내 잡음의 영향이 최소화되는 적절한 영역의 크기는 5×5 로 나타났다. 또한 모든 실험 영상에서 밝기값의 비선형성은 존재하지 않는 것으로 확인되었다. 실험결과는 KOMPSAT-2 영상이 클로로필 농도와 같은 수질인자 추정을 위해 사용될 수 있는 가능성을 보여준다.

1. 서론

고해상도 위성영상은 세밀한 공간 정보의 획득이 가능하기 때문에 중, 저해상도의 위성영상에 비해 하천의 수질추정에 적합하며 이에 위성영상을 이용한 수질추정에 관한 다양한 연구가 수행되었다(Chang *et al.*, 2009; Ekercin, 2007; Ormeci *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2002). 그러나 고해상도 위성영상은 수면지역에서 밝기값 비평활화 및 비선형성과 같은 방사학적 오차를 포함하고 낮은 SNR을 가지며 이러한 요소들은 영상 밝기값에 잡음의 형태로 나타난다. 특히 밝기값 비선형성은 각 CCD(Charge-coupled device) 소자에 입사된 광량(Radiance)과 밝기값 간의 관계가 선형이 아닌 형태로 나타나는 현상을 의미하며 이와 같은 현상은 영상의 밝기값을 통해 추출되는 정보의 정확도를 저하시킨다.

현재 운영중인 IKONOS, Quickbird, GeoEye-1과 같은 고해상도 위성영상은 발사 전, 후의 충분한 검보정을 통해 밝기값-입사광량 간 변환관계식을 제공하고, 영상의 선형성을 보장하고 있다. 그러나 KOMPSAT-2 영상은 충분한 검보정이 이루어지지 못하여 밝기값-입사광량간 변환관계식이 제공되지 않으며 아주 어두운 영역이나 밝은 영역에서 밝기값 선형성이 보장되지 않을 수 있는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2008; 이동한, 2011). 또한 KOMPSAT-2 영상은 다른 고해상도 위성영상인 IKONOS, Quickbird 영상에 비해 SNR 수치가 낮고 영상 품질 인자인 NIIRS(National Imagery Interpretability Rating Scale)값이 비교적 작은 것으로 알려져 있다(김재인과 김태정, 2011). 이는 영상 내에 많은 잡음이 존재함을 나타내며 KOMPSAT-2 영상의 활용성을 저하시키는 요인이 된다.

따라서 본 논문에서는 KOMPSAT-2 영상과 IKONOS/GeoEye-1 영상 간의 상호비교를 통해 KOMPSAT-2

영상의 선형성을 검증함으로써 수질 추정을 위한 KOMPSAT-2 영상의 활용 가능성을 확인하고자 한다. 이를 위해 KOMPSAT-2 영상과 동일지역을 비슷한 시기에 촬영한 IKONOS와 GeoEye-1 영상을 기준영상으로 사용하였다. KOMPSAT-2 영상 내 존재하는 잡음의 영향을 최소화하기 위해 동일 지역에 대해 비교영역의 크기를 변화시켜가며 영역 내 평균값 간의 선형성 또한 비교하였다. 이를 통해 KOMPSAT-2 영상의 활용 시 잡음의 영향을 최소화 할 수 있는 영역의 크기를 제시하였고, KOMPSAT-2 영상 밝기값의 선형성을 검증하였다.

2. 실험 자료 및 전처리 수행

본 논문에서는 실험을 위해 IKONOS/GeoEye-1 영상과 KOMPSAT-2 영상을 사용하였으며 영상간의 밝기값 상호 비교 분석을 위해 비슷한 시기에 동일지역을 촬영한 영상들을 사용하였다. Table 1에 본 연구에서 사용된 영상의 속성과 각 영상의 비교지점 개수를 나타내었다. Table 1의 Elec_Gain(Electrical Gain)값은 입사된 광량의 증폭 정도를 나타내며 메타데이터 파일에서 제공된다. 본 연구에서 사용된 KOMPSAT-2영상은 Elec_Gain값이 서로 동일하지 않다. 이는 한국항공우주연구원에서 겨울철 영상이 어둡게 나타나는 문제를 해결하기 위해 2010년 11월부터 2011년 4월까지 입력된 빛의 세기를 증폭시켜 영상을 획득하였기 때문이다. Elec_Gain값이 '0 0 0 0' 인 칠곡지역의 KOMPSAT-2 영상은 입사광량을 증폭하지 않고 획득한 영상이며, Elec_Gain값이 '37 37 37 37' 인 여주지역과 죽산지역의 KOMPSAT-2 영상은 입사광량을 증폭시켜 획득한 영상이다. Table 1에서 비교지점 개수는 기준영상과 KOMPSAT-2 영상에서 밝기값 상호비교를 위하여 선

Table 1. Characteristics of KOMPSAT-2, IKONOS and GEOEYE-1 images used for the experiments

Area	Reference images		Acquisition date Elec_Gain	KOMPSAT-2 No. of target point	KOMPSAT-2	
	Sensor type	Acquisition date			MS	Pan
Chilgok	IKONOS	2009. 12. 26	2009. 12. 31	0 0 0 0	318	225
Yeoju	IKONOS	2010. 12. 07	2010. 12. 16	37 37 37 37	318	170
Juksan	GeoEye-1	2011. 04. 14	2011. 04. 20	37 37 37 37	322	-

Fig. 1. KOMPSAT-2 images used for the experiments.

 Fig. 2. IKONOS, GeoEye-1 images used for the experiments;
 (a), (b): IKONOS, (c): GeoEye-1.

정된 지점을 의미한다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 3개 지역의 KOMPSAT-2 원영상을 보여주며, Fig. 2에 사용된 IKONOS, GEOEYE-1 원영상을 나타내었다. 총 3개의 지역에 대해 다중분광 영상을 확보하였으며 칠곡, 여주 지역은 전정색(Panchromatic) 영상도 함께 확보하여 실험에 사용하였다.

밝기값 상호비교에 앞서 실험에 사용되는 모든 영상에 대해 정사보정을 수행하였다. 정사보정 수행 시에 필요한 지상기준점은 한반도 지역 Spot-5 정사영상 DB와 1:5000 수치지도로부터 추출된 10 m 간격 DEM DB를 이용하여 각 영상에 대해 약 30개 가량을 수동으로 취득하였다. 정사보정에 필요한 DEM은 앞서 지상기준점 추출을 위해 사용한 10 m 간격 DEM DB를 사용하였다. Table 2는 정사보정 수행 시 사용된 GCP의 수와 센서모델 정확도 보여 준다. 정사보정 후 획득된 정사영

Table 2. The No. GCPs and sensor model accuracy

Area	KOMPSAT-2		Ref. Image	
	No. GCPs	Model Acc. (Pixel)	No. GCPs	Model Acc. (Pixel)
Chilgok	30	1.190	19	0.776
Yeoju	29	1.211	25	0.782
Juksan	30	1.299	24	1.194

Fig. 3. Test area for noise analysis over inland water.

상의 위치정확도는 한반도 지역 Spot-5 정사영상과의 비교를 통해 산출되었으며, 그 결과 1~2 pixel 이내의 정확도를 갖는 것을 확인하였다.

3. 수면지역의 잡음분석 결과

전처리 과정을 수행하고 KOMPSAT-2 영상과 IKONOS/GeoEye-1 영상에 대해 수면지역의 잡음을 분석하였다. 분석을 위해 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 다중분광 영상을 사용하였고, 분석 지역은 수면지역 내에 위치한 인공구조물의 영향을 제외시키기 위해 수동으로 선정하였다. Fig. 3에 선정된 분석지역을 나타내었으며 실제 분석영역은 가로 40 m, 세로 40 m 정도로 하였다. 사용된 다중분광영상의 각 밴드를 육안으로 관찰한 결과 근적외선 밴드를 제외한 모든 밴드의 수면지역에서 잡음이 관찰되었다. 육안으로 관찰되는 잡음의 크기는 각 밴드 별로 상이하게 나타났으며, KOMPSAT-2 영상이 IKONOS/GeoEye-1 영상보다 약간의 잡음이 포함되어 있음을 확인할 수 있었다. 이를 정량적으로 나타내기 위해 선정된 지역에 대해 지역 내 밝기값의 평균과 표준편차를 산출하였다. 산출된 표준편차는 지역 내 밝기값의 변화량을 의미하므로, 이 값의 비교를 통해 영상의 잡음 정도를 판단하였다. Table 3에 선정된 분석 지역 중 한 곳에 대한 분석지역 영상과 지역 내 밝기값 평균 및 표준편차를 나타내었으며 Table 4에 모든 분석 지역에 대한 각 밴드 밝기값의 평균 및 표준편차를 계산한 후 이 값의 평균을 정리하여 나타내었다. 청색밴드의

Table 3. Subset images and statistics for the target region

	KOMPSAT-2	GeoEye -1
Blue Band (Ave/Std)	(822.15 / 3.42)	(440.71 / 3.30)
Green Band (Ave/Std)	(744.06 / 4.18)	(317.97 / 3.30)
Red Band (Ave/Std)	(388.72 / 3.44)	(189.34 / 3.34)

경우KOMPSAT-2 영상의 표준편차가 IKONOS/GeoEye-1 영상에 비해 크게 나타남을 확인할 수 있으나 녹색밴드와 적색밴드에서는 KOMPSAT-2 영상의 표준편차가 더 작게 나타나거나 유사한 것을 확인할 수 있었다. 또한 각 영상의 분석지점에서 밝기값 평균의 변화패턴이 유사하게 나타났으며 이를 통해 수면지역에서 전반적인 밝기값의 경향이 일치하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 각 영상의 분석지점에 대한 청색밴드의 밝기값 평균을 나타낸다.

Table 4. The statistics of the target region (Blue, Green and Red band of KOMPSAT-2, IKONOS/GeoEye-1 images)

Area	Sensor type	Blue		Green		Red	
		Mean	Stdev	Mean	Stdev	Mean	Stdev
Chilgok	KOMPSAT-2	322.30	1.8882	271.72	1.7930	132.93	1.1253
	IKONOS	216.60	1.6621	217.68	1.8049	113.63	1.6386
Yeoju	KOMPSAT-2	446.86	3.0670	385.24	3.1413	199.13	1.8832
	IKONOS	328.12	1.8715	350.38	2.1983	246.94	2.0848
Juksan	KOMPSAT-2	861.14	4.4729	796.17	4.2601	422.94	3.2134
	GeoEye-1	469.84	4.2341	346.89	4.4773	221.95	4.8411

Fig. 4. Graph of mean value in the target region.

4. 밝기값 상호비교 결과

내륙 수면지역의 밝기값 및 잡음 분석에 이어 기준영상과 KOMPSAT-2 영상의 밝기값 비교분석을 수행하였다. 본 실험을 위해 밝기값이 균일하게 나타나는 내륙 수면지역 및 지표 피복물을 분석지점으로 선정하였다. 내륙 수면지역의 경우 영상 획득일의 차이로 인해 두 영상에서의 밝기값의 분포 패턴이 동일하지 않을 수 있으며, 수면지역의 밝기값 비교만으로는 영상 전체의 밝기값 특성을 나타낼 수 없다. 따라서 영상 획득일에 비교적 영향을 적게 받고 각각 다양한 밝기값을 갖는 지표 피복을 분석 지점으로 선정하여 영상 전체의 밝기값 특성을 분석하였다. 분석 지점은 동일 지상점에 해당하는 기준 영상점과 KOMPSAT-2 영상점을 이용하였다. 분석 지점은 임의적으로 선정되는 것이 일반적이나 임의로 선정된 분석 지점은 아래의 Fig. 5와 같이 영상 해상력의 차이 및 소규모 건물들에 의해 분석 지점 주변의 밝기값이 비균일하게 나타날 수 있다. 이는 주변지역에 대한 밝기값의 평균을 이용하는 본 연구에서는 부정확한 결과의 산출을 초래하여 본 연구에서는 분석 지점 선정 시 각 영상을 육안으로 분석하여 Fig. 6과 같이 분석 지점 주변지역의 밝기값이 균일하게 나타나는 곳을 채

Fig. 5. KOMPSAT-2 images(Left) and Reference images (Right) of points excepted from extraction.

택하였다. 또한 잡음이 많이 포함되어 동일 지상점에 대한 두 영상에서의 영상점의 밝기가 상이하거나, 인접한

Fig. 6. KOMPSAT-2 images(Left) and Reference images (Right) of extracted points.

화소와 밝기값의 차이가 큰 지점은 채택하지 않았으며 움직이는 객체가 포함된 지역과 Fig. 2의 여주지역 영상에서 구름 및 연무 지역은 제외하였다.

이러한 방법으로 추출된 각 영상의 비교지점은 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었으며 Fig. 7은 다중분광영상에서의 비교지점, Fig. 8은 전정색 영상에서의 비교지점이다.

본 연구에서는 비교지역의 크기를 KOMPSAT-2 영상에서 1×1, 3×3, 5×5, 7×7, 9×9(pixel)로 변화시켜 가며 밝기값 상호비교를 수행하였다. 기준영상의 비교지역은 KOMPSAT-2 영상의 비교지역과 일치하도록 정

Fig. 8. Target point for comparison in panchromatic images; (a) Chilgok, (b) Yeoju.

의하였으며, 정의된 지역 내의 밝기값 평균을 이용하여 두 영상간의 상관분석을 수행하였다. 분석결과는 결정계수로 제시하였으며 이는 수식 1을 통해 산출된다. 수식의 x_i 와 y_i 는 비교지점에 대해 관측된 KOMPSAT-2 영상의 밝기값과 기준영상의 밝기값을 의미하며, $\hat{y}$ 는 x_i 과 y_i 로부터 추정된 선형 회귀식에서 결정되는 값이다. 이를 통해 두 밝기값으로부터 추정된 선형 회귀식의 적합도를 판단할 수 있으며 값이 1에 가까울수록 두 밝기값간의 관계가 선형임을 뜻한다.

Fig. 7. Target point for comparison in multispectral band; (a) Chilgok, (b) Yeoju, (c) Juksan.

Table 5. The coefficients of determination calculated from target area between two images

Area	Band	Sensor type	Size of target region				
			1×1	3×3	5×5	7×7	9×9
Chilgok	Blue	K2-IK	0.768	0.786	0.789	0.787	0.780
	Green	K2-IK	0.770	0.795	0.798	0.797	0.792
	Red	K2-IK	0.828	0.850	0.854	0.853	0.847
	NIR	K2-IK	0.822	0.846	0.855	0.856	0.855
Yeoju	Blue	K2-IK	0.641	0.648	0.647	0.640	0.630
	Green	K2-IK	0.728	0.736	0.738	0.736	0.730
	Red	K2-IK	0.795	0.805	0.808	0.808	0.847
	NIR	K2-IK	0.824	0.841	0.846	0.849	0.849
Juksan	Blue	K2-GE	0.546	0.627	0.707	0.736	0.755
	Green	K2_GE	0.582	0.663	0.745	0.777	0.796
	Red	K2_GE	0.793	0.861	0.907	0.921	0.923
	NIR	K2_GE	0.724	0.793	0.859	0.885	0.895

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{y}_1 - \bar{y})^2}{\sum(y_1 - \bar{y})^2} \quad (1)$$

상기 설명된 상호비교 방법을 정사보정 된 KOMPSAT-2 다중분광 영상과 IKONOS/ GEOEYE-1 다중분광 영상에 적용하여 상관분석을 수행하였다. Table 5에 대상 지역 내 밝기값 평균을 이용하여 산출된 결정계수를 나타내었다. 영상 및 밴드 별로 약간의 차이는 존재하나 대부분의 영상에서 5×5 영역을 비교하였을 때 결정계수가 최대가 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 5×5 영역 내의 밝기값 평균이 잡음이 가장 최소화된 값으로 산출되어 두 영상 간의 선형성을 가장 크게 나타내는 것을 의미한다. 또한 겨울에 획득된 칠곡지역 영상과 여주지역 영상의 밝기값 간의 결정계수는 비슷하게 나타났으며 여름에 획득된 죽산지역 영상의 밝기값 간 결정계수보다 큰 결정계수를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 여름에 수면의 반사율에 영향을 미치는 여러 수질인자의 변동이 크기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 정사보정 된 KOMPSAT-2 영상과 IKONOS/ GeoEye-1 영상의 밝기값 간의 패턴을 나타낸다. KOMPSAT-2 영상과 IKONOS/ GeoEye-1 영상의 밝기값 간의 패턴이 비교적 선형으로 나타나며 입력광량의 증폭으로 인해 밝기값의 최소값이 증가하고 선형 패턴의 기울기가 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 죽산지역의 청색밴드와 녹색밴드의 경우 KOMPSAT-2 영상의 밝기값이 포화상태에 도달하여 기준영상의 밝기값이 증가

함에도 불구하고 최대 밝기값인 1024로 나타나는 것을 확인하였다.

밝기값 간의 상호비교 후 KOMPSAT-2 영상의 ELEC_GAIN값의 영향을 보다 절대적으로 비교하고 밝기값에 포함된 대기의 영향을 제거하고자 대기보정을 통해 반사율(Reflectance) 영상을 생성하였다. KOMPSAT-2 영상의 경우 밝기값과 입사광량간 관계식이 제공되지 않아 절대 대기보정에 어려움이 있어 상대대기보정 알고리즘을 이용하여 대기보정을 수행하였다. 적용된 대기보정 기법은 수정된 DOS(Dark object subtraction of atmospheric path radiance)기법으로 이에 대한 상세한 내용은 별도의 논문에 기술할 예정이다.

Fig. 10은 대기보정을 통해 획득된 반사율 영상을 이용하여 비교한 결과를 나타낸 것으로 이 패턴을 통해 Elec_Gain 값에 의한 기울기의 변화를 보다 명확하게 확인할 수 있다.

전정색 영상의 밝기값 패턴 분석은 대상 지역 중 전정색 영상이 존재하는 칠곡, 여주 지역의 Fig. 8에 나타난 대상지점에 대해 수행되었으며, 그 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 전정색 영상의 패턴도 다중분광 영상의 패턴과 흡사하게 선형으로 나타나며 ELEC_GAIN값에 따른 기울기의 변화가 존재함을 확인하였다. 특히 여주 지역의 전정색 영상은 모든 비교지점의 밝기값이 150~900이하 영역에 포함되며, 이 영역은 입사광량과 밝기값 간의 선형성이 보장되는 것으로 알려져 있다 (Lee et al., 2008; 이동한, 2011). 여주 지역의 전정색

Fig. 9. A Brightness value distribution pattern between KOMPSAT-2 and IKONOS/GeoEye-1 multispectral images.

Fig. 10. A Reflectance distribution pattern between KOMPSAT-2 and IKONOS, GeoEye-1 multispectral images.

영상은 기준영상의 밝기값과 0.85의 높은 결정계수를 갖는 것으로 나타났으며 이는 이전 연구에서 알려진 바와 같이 이 영역에서 선형성을 갖는 것을 보여준다.

본 연구에서 수행한 밝기값 패턴 분석결과, 분석에 사용된 모든 KOMPSAT-2 영상에서 밝기값의 비선형성은 존재하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11. A DN value distribution pattern between KOMPSAT-2 and IKONOS panchromatic images.

5. 결 론

본 연구에서는 IKONOS, GeoEye-1 영상을 이용하여 KOMPSAT-2 영상 내륙 수면지역의 잡음 현상을 파악하였고, 밝기값의 선형성을 검증하였다. 그 결과 KOMPSAT-2 영상이 IKONOS/ GeoEye-1 영상과 유사한 잡음을 포함하고 있으며 밝기값의 경향이 일치하고 KOMPSAT-2 영상 내 5 x 5 영역의 밝기값 평균을 이용해 잡음의 영향을 최소화 할 수 있는 것으로 확인되었다. 또한 본 연구에서 사용된 모든 영상에서 KOMPSAT-2 영상의 밝기값과 기준영상의 밝기값 간의 비선형성이 관찰되지 않았으며 이와 같은 결과는 KOMPSAT-2 영상의 활용 가능성을 보여주었다. 그러나 본 연구에서 사용된 3개 지역에 대한 KOMPSAT-2 영상과 IKONOS/ GeoEye-1 영상의 획득날짜가 정확히 일치하지 않았고 영상 획득의 많은 제약조건으로 인해 다양한 영상에 대한 비교가 수행되지 못하였다는 한계가 존재한다. 따라서 이후 다양한 지역에 대한 영상 확보 및 이를 이용한 추가적인 비교를 수행하고 영상의 밝기값을 이용한 수질추정 등을 통해 KOMPSAT-2 영상의 활용성에 대해 검증할 예정이다.

사 사

본 연구는 환경부 낙동강 수계 환경기초사업과 다목적실용위성 3호 시스템 종합개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 김재인, 김태정, 2011. NIIRS 추정을 위한 자연표적 기반의 에지분석기법 개발, 대한원격탐사학회지, 27(5):587-599.
- 이동한, 2011. 시간 지연 적분 방식의 고해상도 위성 영상자료의 비대칭 점 분포함수의 복원, 연세대학교 대학원 박사학위 논문.
- Chang, C., C. Liu, C. Wen, I. Cheng, C. Tam, and C. Huang, 2009. Monitoring reservoir water quality with Formosat-2 high spatiotemporal imagery, *Journal of Environmental Monitoring*, 11(11): 1982-1992.
- Ekercin, S., 2007. Water quality retrievals from high resolution IKONOS multispectral imagery: A case study in Istanbul, Turkey, *Water, Air & Soil Pollution*, 183(1-4): 239-251.
- Kim, T.K., G.S. Cho, and K.E. Kim, 2002. Mapping water quality of Yongdam reservoir using Landsat ETM imagery, *Korean Journal of Remote Sensing*, 18(3): 141-146.
- Lee, D.H., D.C. Seo, J.H. Song, J.H. Chung, S.Y. Park, M.J. Choi, and H.S. Lim, 2008. Image restoration of calibration and validation for KOMPSAT-2, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(Part B1): 57-62.
- Ormeci, C., E. Sertel and O. Sarikaya, 2009. Determination of chlorophyll-a amount in Golden Horn, Istanbul, Turkey using IKONOS and in situ data, *Environmental Monitoring and Assessment*, 155(1): 83-90.