

# Landsat 8 이미지영상을 이용한 영양염류농도 추정; 금강을 대상으로

## Estimation of Water Quality using Landsat 8 Images for Geum-river, Korea

임 지 상\* / 백 종 진\*\* / 김 형 록\*\*\* / 최 민 하\*\*\*\*  
Lim, Jisang / Baik, Jongjin / Kim, Hyunglok / Choi, Minha

### Abstract

In this study, the water quality parameters of Geum-river were estimated using Landsat 8 satellite image data which had launched in March 2013. The goal of this research is to predict HAB and to monitor spatial pattern of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) because both TN and TP are the dominant factors of the growth of harmful algal blooms (HABs). To investigate the relationship between satellite band reflectance and in situ measurement value, Pearson' correlation coefficient analysis was used. The band2, 3, 4 and 5 reflectance values among 11 bands of Landsat 8 were used which was highly associated with detecting TN and TP. The 20 in situ data set with satellite's overpass time were identified. TN showed positive relation with band 2 (0.48), band3 (0.62), band4 (0.57) at a significance level of  $p < 0.05$ . TP also showed high correlation for band2 (0.59), band3 (0.59), band4 (0.58) at a significance level of  $p < 0.01$ . The optimal regression equation models were constructed for TN and TP based on multiple regression equations. The estimated concentration based on derived regression equations of TN and TP were compared with in situ measurement data. Finally, the spatial pattern of the two parameters was able to be monitored through mapping on November 12, 2013 and April 21, 2014.

**Keywords** : Landsat 8, Geum-river, water quality, nitrogen, phosphorus

### 요 지

2013년 3월에 발사된 Landsat 8 인공위성의 이미지데이터를 이용하여 금강유역을 대상으로 수질인자에 대한 평가를 수행하였다. 본 연구의 목적은 다양한 수질인자 중 녹조에 직접적인 영향을 미치는 총질소와 총인의 농도를 추정함으로써 궁극적으로 수생태계에 악영향을 미치는 녹조의 발생을 모니터링 하는 것이다. 현장실측데이터와 인공위성 데이터간의 상관관계를 규명하기 위하여 Pearson' 상관계수를 이용하여 그 관계를 파악하였다. Landsat 8이 촬영되는 시기를 포함하는 총 20개의 현장실측 데이터가 수집되었으며 Landsat 8의 11개의 밴드 중, 밴드2, 3, 4의 반사도 값이 총인과 총질소를 탐지하는데 있어서 가장 상관성 높은 것으로 나타났다. 총질소는 유의수준 0.05에서 밴드2(0.48), 3(0.62), 4(0.57)과 높은 양의 상관관계를 보였으며, 총인의 경우, 유의수준 0.01에서 밴드2(0.59), 3(0.59), 4(0.58)로 높은 양의 상관관계를 나타냈다. 5번 밴드는 유의수준을 벗어남으로써 두 수질인자를 탐지하는데 상관성이 떨어지는 것으로 나타났다. 상관성이 높았던 밴드간의 조합을 통해서 총질소와 총인에 대한 각각의 최적 회귀식이 다중 회귀식을 근거로 구축되었다. 유도된 회귀식으로 계산된 총질소와 총인의 농도값은 통계기법인 Bias와 RMSE를 이용하여 현장실측데이터들과 비교·검증되었다. 최종적으로, 2014년 4월 21과 2013년 11월 12일에 대한 맵핑을 수행함으로써 총질소와 총인의 공간적인 분포를 시각적으로 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : Landsat 8, 금강, 수질, 총질소, 총인

\* 성균관대학교 수자원전문대학원 수자원학과 석사과정 (e-mail: js0515@skku.edu)

Graduate Student, Dept. of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

\*\* 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사수료 (e-mail: jjbaek@skku.edu)

Graduate Student, Dept. of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

\*\*\* 성균관대학교 수자원전문대학원 수자원학과 석사과정 (e-mail: hkim@skku.edu)

Graduate Student, Dept. of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

\*\*\*\* 교신저자, 성균관대학교 수자원전문대학원 수자원학과 부교수 (e-mail: mhchoi@skku.edu, Tel: 010-9352-4068)

Corresponding Author, Associate Professor, Dept. of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan Univ., 2066 Seobu-ro, Jangang-gu, Suwon, Gyeonggi-do 440-746, Korea

## 1. 서 론

녹조(algal bloom)란 부영양화된 호소수나 유속이 현저히 느린 강, 호수로 과도한 영양물질(총질소, 총인)이 유입되어 남조류나 녹조류를 포함한 식물성 플랑크톤이 번성함으로써 발생한다(Nam et al., 2011). 녹조현상은 수중으로 투과되는 햇빛을 차단시킴에 따라 추가로 유입되어야 할 물의 용존산소량을 확연히 줄어뜨리게 만들어 수중생물을 생존하지 못하게 만든다. 이러한 결과로 동·식물 및 그 수역의 생태계를 파괴하며 사람의 건강에도 치명적인 영향을 미쳐 경제, 사회, 환경적인 측면에서 많은 문제를 야기 시키게 된다(Matthews et al., 2010). 녹조를 예방하기 위해서는 녹조 발생에 지배적인 인자들인 영양염류를 사전에 차단하거나, 이미 하천이나 해양에 유입되었을 시에는 모니터링을 통해 관찰하며 녹조발생 취약가능지역을 철저히 관리하는 것이 필요하다.

영양염류의 지배적인 인자로 알려진 총질소와 총인의 농도를 측정하기 위해 현재까지 우리나라에서는 주로 국립환경과학원에서 운영 중인 실시간 수질 자동측정기와 사람이 직접 호소수를 취수하여 실험하는 방법을 이용한다. 이 두 방법은 각 해당지점에서는 정확한 농도 값을 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 기기설치, 취수와 분석화확 실험을 하는데 있어 경제적인 비용과 시간적인 소모가 상당하여 효율성이 떨어진다. 수질의 특성상 유속의 흐름에 따라 시·공간적으로 강이나 호소수에서 광역적으로 퍼져나 가는데 기존의 두 방법으로는 수질의 분포상태를 모니터링하기에 적합하지 못하다(Giardino et al., 2001; Sudheer et al., 2006). 이러한 한계를 보완하거나 혹은 효과적인 수질 인자들의 농도 측정을 위해 선행연구에서는 인공위성(satellite)센서나 레이더를 이용하여 수질 측정과 모니터링에 관한 연구를 수행되었다(Giardino et al., 2001; Bilge et al., 2003; Bolgrien et al., 1995). 지구상의 모든 물질들은 각각의 구성입자에 따라 태양에너지를 흡수하거나 반사 혹은 산란과 같은 고유의 특성을 가지고 있다. 이런 물질의 특성을 인공위성이나 레이더는 센서를 통하여 감지·파악할 수 있으므로, 지표와 대기뿐만 아니라 수체의 수질 정보를 얻을 수 있다(Kim et al., 1996).

인공위성센서를 이용한 수질측정의 선행연구들을 살펴보면, 농도측정의 정확성이 상당히 높을 뿐만 아니라 연구지역에서의 시간적 공간적분포를 제공해줌으로써 모니터링을 가능하게 하였다. Giardino et al. (2001)은 이탈리아의 2,000개 호수 중 가장 큰 4개의 호수를 선별해 인공위성 밴드와 수질측정기준의 중요한 항목인 클로로필과

투명도에 대해 연구하였다. 상관분석 방법을 통해 클로로필( $R^2=0.99$ ), 투명도( $R^2=0.85$ )가 높은 상관관계를 나타내는 것으로 확인되었으며, 인공위성밴드와 수질인자간의 서로 밀접한 관계가 있음을 밝혀냈다. 또한, Landsat 5 TM (Thematic Mapper) band6 영상자료를 이용하여 수온의 공간적인 분포도를 제시하였다. Bilge et al. (2003)은 터키의 Porsuk 댐 저수지에서의 수질인자를 추정하기위해 Landsat 5 위성과 수질인자들 사이의 상관관계를 파악하였다. 수질농도를 추정하기위해 다중회귀분석 방법을 사용하였으며, ANOVA를 통해 검증을 실시하였다. 검증결과는 상당히 유효했으며 빛투과 강도깊이(transmitted light intensity depth)를 대상으로 공간 분포도를 제시하였다. 터키 Beysehir 호수를 대상으로 Nas et al. (2010)은 Landsat 5 TM을 이용하여 위성밴드의 반사도 값과 부유물질, 탁도와 클로로필-a를 통계적 기법에 근간하여 상관관계 파악 후 수질인자들의 공간분포도를 확인하였고 좋은 결과를 보여주었다. Wu et al. (2010)은 Landsat 5 TM 영상자료를 이용하여 중국의 Qiantang 강에 존재하는 총인에 대한 연구를 수행하였다. 다양한 밴드조합을 통해 산정된 회귀 모델식을 근거로 총인이 위성센서의 반사도 값과 상당한 상관관계가 있음을 보였으나, 다른 지역에 이를 적용하기 위해서는 실측자료의 검증과 보정이 필요하다고 언급하였다. 이외에도, 부유물질을 포함한 다양한 수질인자들을 추정 및 시·공간적 분포를 모니터링하기 위해 NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), SPOT High Resolution Vertical (HVR) 등의 센서나 타 위성들이 연구에 사용되었다(Bolgrien et al., 1995; Chacon and Torres et al., 1992; Dekker et al., 2002).

현재까지 원격탐사기술을 활용한 많은 선행연구들은 주로 클로로필-a, 부유물질, 탁도, 투명도와 같은 광학적 특성이 뚜렷한 수질항목들을 연구인자들로 선정하였다. 일반적으로, 총질소와 총인은 용해성 물질로서 광학적 특성이 뚜렷하지 않은 것으로 알려져 있다(Dekker, 1996). 이러한 이유로 인공위성을 이용한 해외 및 국내 연구들에서 총질소와 총인에 대한 연구는 타 수질인자들(클로로필, 부유물질, 탁도 등)에 비해 활발히 이뤄지지 않은 실정이다. 하지만, 일부 선행연구들은 원격탐사기술로도 충분히 총질소와 총인에 대해 관측과 분석이 가능함을 나타내었다(Lillesand et al., 1983; Song et al., 2011). Lillesand et al. (1983)은 Landsat MSS의 band4와 band5, 6, 7의 Digital number (DN)값에 제곱을 취한 값을 총질소에 적용하여  $R^2=0.90$ , 총인의 경우  $R^2=0.73$ 의 높은 상관성을 보였다. Song et al. (2011)은 Landsat TM데이터로 유도된

회귀식과 neural network model를 이용하여 Chagan Lake의 클로로필, 총인, 탁도, 용해물질을 비교, 예측하였다. 그 결과 회귀식을 통한 계산된 총인은  $R^2=0.74$ , neural network model은  $R^2=0.99$ 로 두 방법 모두 높은 상관관계를 보였다.

클로로필-a, 부유물질, 탁도와 같은 수질항목들 뿐만 아니라 하천의 수질생태계에 직·간접적으로 영향을 미치는 녹조에 대비하기 위해서는 영양염류(총질소, 총인) 또한 반드시 연구되어야 한다. 금강은 산업단지와 가정, 농·축산지역에서 유출되는 영양물질의 유입으로 녹조와 같은 심각한 수질오염의 우려가 제기되고 있는 상황에서 환경적, 경제적으로 상당한 피해가 예상되고 있다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구들의 결과를 토대로 2013년 3월에 발사된 Landsat 8 optical sensor의 영상자료를 이용하여 금강을 대상으로 녹조발생에 가장 영향을 미치는 것으로 알려진 영양염류(총질소, 총인)의 농도 추정을 수행하였다. 농도추정을 하기위해 우선적으로 위성영상자료와 수질인자간의 상관성을 검토하였다. 또한, 유도된 다중회귀식을 활용하여 예측값과 실측값을 비교·분석 하였다. 늦가을(11월)과 초여름(4월)의 위성영상자료를 이용하여 총질소와 총인에 대한 시·공간적 모니터링을 제공하였다.

## 2. 연구 지역 및 데이터

### 2.1. 연구 대상지역

대한민국 4 대강 중 하나인 금강은 소백산맥 신무산 계곡에서 발원하여 군산만의 금강하굿둑 서해부근으로 빠져나가는 국가하천이다. 호수처럼 잔잔하여 호강이라고도 불리는 금강은 북위  $35^{\circ}35' \sim 37^{\circ}05'$ , 동경  $126^{\circ}41' \sim 128^{\circ}25'$ 에 걸쳐 우리나라의 중앙부 서쪽에 위치하고 있으며 유로연장은 약 400 km, 면적  $9,900 \text{ km}^2$ 이다. 크고 작은 20개의 지류가 본류로 합류 하는데 금강의 주요 지류는 논산천, 미호천, 갑천, 강경천등이 있고, 전북평야, 호서평야가 둘러싸고 있기 때문에 전국에 손꼽히는 쌀 생산지대이다. 금강의 동서폭은 약 120 km, 남북길이는 약 160 km로 이뤄져 있다. 금강유역은 14개의 중권역으로 구분되어 있으며, 대권역의 유역둘레는 약 740 km이고, 유역의 평균 폭은 25 km, 유역의 평균표고는 해수면 85.31 m, 유역평균 경사는 16.74%이다(Park et al., 2012). 금강은 주로 충청권과 대전의 산업, 농업, 생활용수로 이용되며, 호남 및 충청도민들의 주요 식수근원지이기도 하다. 기후는 한반도 중앙에 위치하며 온대 북한계의 기후특성을 가지고 있어, 이 유역의 평균기온은  $11.5^{\circ}\text{C}$ , 연강수량 1,100~1,300 mm 도달한다.

## 2.2 자료수집 및 분석

환경부와 국립환경과학원의 2013년 수질측정망 운영계획보고서에 따르면 전국에 67개소, 금강유역에는 총 13개의 수질자동측정기기를 운용하고 있다. 사람이 직접 취수하여 수질농도를 측정하는 일반측정망의 경우 전국에 500여개, 총량측정망의 경우 270여개소의 채수지점이 존재하지만 위성영상자료와의 overpass time에서 발생하는 오차를 최소화하기 위하여 본 연구에서는 수질 자동측정기에서 측정되는 일별 수질자료를 이용하였다. 수질인자의 농도추정을 위해서는 우선적으로 인공위성 센서 밴드의 반사도 값과 수질인자간의 상관분석이 선행되어야 한다. 수질인자와 band 사이의 상관성이 이루어져야 각 인자에 민감하게 반응하는 밴드를 구분할 수 있기 때문이다. 이를 위해 금강유역의 수질자동측정기기 13개 지점(부여, 유구천, 공주, 미호천, 남면, 갑천, 현도, 대청호, 장계, 옥천천, 이원, 봉황천, 용담호)에서는 총질소와 총인에 대한 일별, 월별 데이터를 제공하지만, 일부지점과 연구날짜에 해당하는 자료들에서 결측값들이 존재하고 Landsat 8 위성의 촬영시간주기(16일)를 고려했을 시, 본 연구를 위해 이용 가능한 지점은 총 7곳(장계, 대청호, 현도, 옥천천, 이원, 부여, 남면) 이었다(Fig. 1). 분석을 위한 제약사항은 Landsat 8위성의 촬영시간주기와 동일한 실측수질 측정 샘플의 수가 부족한 것이었다. 이러한 제약사항을 본 연구에서 수용 가능하다고 판단한 이유는 Landsat 8 위성에 의한 수질인자에 대한 추정의 정밀성보다는 가용성이 연구의 목적이기 때문이다(Kim et al., 2014). Table 1은 각 연구날짜와 지점에 해당하는 총질소와 총인의 실제 측정된 농도값으로 실시간 수질정보시스템에서 제공된다(<http://www.koreawqi.go.kr>).

## 2.3 Landsat 8

2013년 3월에 National Aeronautics and Space Administration와 the United States Geological Survey에 의해 발사된 Landsat 8 위성은 촬영시간주기가 16일이지만 타 위성에 비해  $30 \times 30 \text{ m}$ 의 높은 공간해상도를 제공하고 있어 수질 모니터링을 하기위해 적절한 것으로 판단된다. Landsat 8 platform에 탑재된 밴드와 각 밴드별 특성은 Table 2에 나타내었다.

Landsat 8 위성 영상자료는 촬영주기가 16일이기 때문에 자료선별 과정에서 어려움이 있었다. 위성영상자료는 대기의 영향에 따라 자료의 질이 좌우 된다. 따라서 자료 선별 시 우선적으로 구름의 영향이 최소인 것(3% 이내)

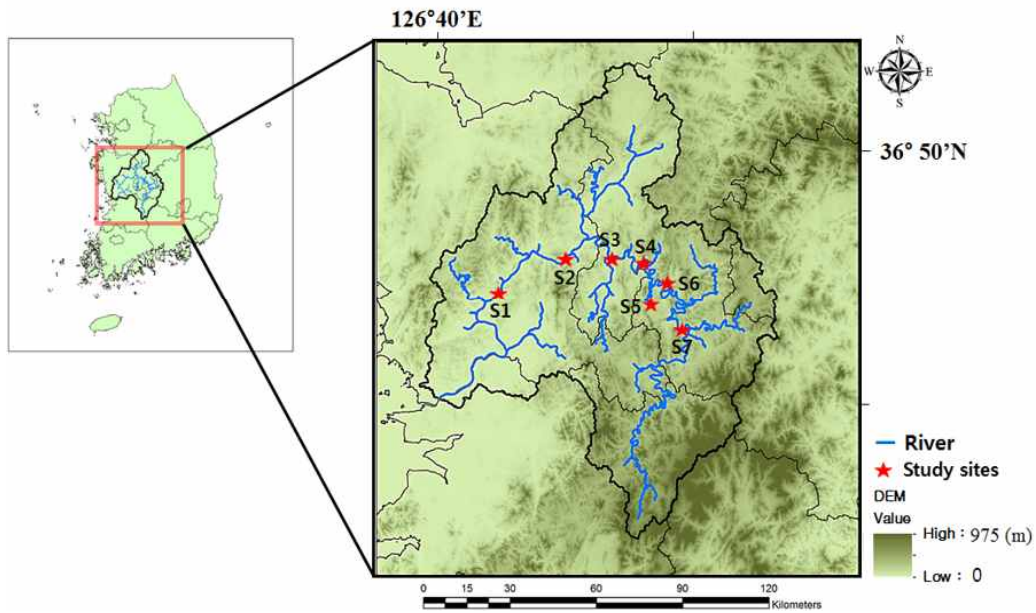


Fig. 1. Study Sites of Guem-river

Table 1. In situ Data in 7 Study Sites about Three Days (2103/6/5, 2013/11/12 and 2014/4/21)

Date	Station (No.)	Total nitrogen (mg/L)	Total phosphorus (mg/L)
2013. 6. 5	Buyeo (S1)	2.399	0.047
	Nammyun (S2)	1.953	0.043
	Hyundo (S3)	1.56	0.004
	Daechungho (S4)	1.384	0.018
	Okcheoncheon (S5)	3.093	0.046
	Jangae (S6)	1.423	0.024
	Iwon (S7)	1.416	0.026
2013.11.12	Buyeo (S1)	3.765	0.045
	Nammyun (S2)	4.133	0.109
	Hyundo (S3)	1.523	0.004
	Daechungho (S4)	1.348	0.014
	Okcheoncheon (S5)	-	-
	Jangae (S6)	1.051	0.015
	Iwon (S7)	1.687	0.009
2014. 4. 21	Buyeo (S1)	2.988	0.065
	Nammyun (S2)	3.726	0.073
	Hyundo (S3)	1.325	0.008
	Daechungho (S4)	2.515	0.014
	Okcheoncheon (S5)	3.016	0.014
	Jangae (S6)	1.552	0.01
	Iwon (S7)	1.596	0.009

The data of Okcheoncheon observation was missed on November 12, 2013.

Table 2. Characteristics of Bands Onboard in Landsat 8 (<http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>)

Sensor	Band (No.)	Wavelength ( $\mu\text{m}$ )	Spatial resolution (m)	Temporal resolution (day)
Operational Land Imager Sensor (OLI)	Band 1	0.44-0.45 $\mu\text{m}$	30 m	16 day
	Band 2	0.45-0.51 $\mu\text{m}$		
	Band 3	0.53-0.59 $\mu\text{m}$		
	Band 4	0.64-0.67 $\mu\text{m}$		
	Band 5	0.85-0.88 $\mu\text{m}$		
	Band 6	1.57-1.65 $\mu\text{m}$		
	Band 7	2.11-2.29 $\mu\text{m}$		
	Band 8	0.50-0.68 $\mu\text{m}$	15 m	
	Band 9	1.36-1.38 $\mu\text{m}$	30 m	
Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Band 10	10.60-11.19 $\mu\text{m}$	100 m	
	Band 11	11.50-12.51 $\mu\text{m}$		

을 우선적으로 선별하였으며, 또한 시각적으로 위성이미지 자료상에 aerosol, 강수, 눈의 영향이 있는 것은 제외시켰다. 그 결과 총 3개(2013/6/5, 2013/11/12, 2014/4/21) 위성 영상자료가 획득되었다.

Landsat 8 platform에는 Operational Land Imager sensor (OLI)와 Thermal Infrared Sensor (TIRS)로 구성되어 있다. OLI 센서는 구름, 물, 눈, 식생과 같은 물질의 특징에 대한 정보를 제공하며 TIRS 센서는 물질의 밝기나 온도 값을 제공할 수 있다(<http://landsat.usgs.gov/landsat8>). 본 연구에서는 밴드와 수질인자간의 상관관계, 총질소와 총인의 농도추정을 위해 OLI 센서의 9개 밴드 중 밴드 2~5번 밴드를 사용하였다. 각각의 위성영상 자료는 USGS에서 관리하는 <http://earthexplorer.usgs.gov/>에서 GeoTIFF 파일로 제공되고 있다. 또한 각 밴드의 반사도 값을 얻기 위해 사용된 지점좌표는 수질측정망 운영계획보고서와 국립환경과학원에서 제공하는 좌표를 사용하였다.

### 3. 연구방법

#### 3.1 위성영상 처리

획득되는 Landsat 8 위성영상자료의 각각의 밴드는 최초에 digital number (DN)로 제공되기 때문에 물에 대한 반사도 값(reflectance value)으로 전환이 필요하다. Landsat series는 각 밴드별로 변환에 필요한 상수를 Metadata file (MTL) 형태로 제공해주기 때문에 이를 이용하여 반사도 값으로 전환할 수 있다. 본 연구에서는 영상촬영시기의 대기정보를 획득하기가 쉽지 않았기 때문에 영상자료를 기반으로 한 COST method를 이용하여 대기보정을 최소화하였다. 이

방법은 Chavez (1996)에 의해 제안된 것으로 대기의 하향 복사량은 극히 작은 것으로 가정하였기 때문에 무시하였으며, DN을 반사도 값으로 전환, 태양에서 지표면(수표면)까지의 대기투과율을  $\cos\theta$  값으로 근사화시킨 것이 특징이다(Park et al., 2012). Eqs. (1) and (4)의 항 중,  $ESUN_{\lambda}$  값은([www.gisagmaps.com](http://www.gisagmaps.com))에서 제공하는 값을 사용하였다.

$$R = \frac{d^2 \times (L_{\lambda, sensor} - L_{\lambda, haze}) \times \pi}{ESUN_{\lambda} \times \cos(\theta) \times TAU_z \times TAU_v + E_{down}} \quad (1)$$

여기서, R은 수표면에서의 무차원 반사도값, d는 지구와 태양사이의 거리,  $L_{\lambda, sensor}$ 은 위성에서의 복사휘도 값 ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )을 의미한다.  $L_{\lambda, haze}$ 은 위성센서의 방향으로 산란되는 값이며, Eqs. (3) and (4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$L_{\lambda, sensor} = Gain_{\lambda} \times DN + Bias_{\lambda} \quad (2)$$

Chavez (1996)는 현실적으로 반사율이 0인 지역은 존재하지 않을 것이라고 가정하여 완전 흑체의 반사율을 1%로 결정, 이로부터 대기의 상향복사량을 구하였다. Chavez (1996)가 제안한 Eqs. (3) and (4)를 통해서 대기의 상향복사량을 계산할 수 있다.

$$L_{\lambda, haze} = L_{min} - L_{1\%} \quad (3)$$

$$L_{\lambda, 1\%} = \frac{0.01 \times ESUN_{\lambda} \times \cos(\theta)^2}{d^2 \times \pi} \quad (4)$$

여기서,  $Gain_{\lambda}$ 과  $Bias_{\lambda}$ 는 Landsat 8 MTL 파일에서 제공

되는 값이다. Eq. (4)에서  $L_{\lambda_{min}}$ 은 위성에서의 최소 복사조도( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )로서 연구자가 반사율이 0일 것이라고 판단하여 선택한 흑체의 복사휘도 값이다.  $ESUN_{\lambda}$ 은 태양으로부터 복사된 복사조도,  $TAU_v$ 은 수표면에서 센서까지의 대기 투과율( $TAU_v=1$ ),  $TAU_u$ 은 태양에서 센서까지의 대기 투과율, ( $TAU_u=\cos(\theta)$ )을 의미한다.  $E_{down}$ 은 대기의 하향복사량이며,  $E_{down}$ 은 0으로 정의한다(Wang et al., 2006).

### 3.2 통계분석 기법 및 다중회귀모델(Multiple regression)

본 연구에서는 7개 지점에서 수질 자동측정기기를 통해 측정된 두 개의 수질인자 항목(총질소, 총인)과 OLI센서 밴드의 반사도 값의 상관성을 산정하기 위해 두 인자 사이의 Pearson 상관분석 방법을 사용하였다. 수질 자동측정기기를 통한 실측 수질 농도값이 위성에서 측정되는 반사도값과 상관성이 있어야 연구 자료로서의 가치가 있기 때문이다. 또한, 회귀모델식을 구축하기 위해 다중회귀식을 사용하였는데, 다중회귀식의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$WQP = a + b \times x_{(2,s)} + c \times x_{(3,s)} + d \times x_{(4,s)} \quad (5)$$

여기서, water quality parameters (WQP)항은 수질 자동측정기기에 연구지점에 대해 실제 측정된 수질인자(총질소, 총인)의 농도 값으로 다중회귀식에서 종속변수로 사용된다. Eq. (5)의 우측 항에서 각각의 숫자(2,3,4)는 밴드의 number(band2, band3, band4, band5)를 의미하며, s는 연구지점, x는 3.1절에서 언급된 것처럼, 획득된 Landsat 8 영상자료에서 DN을 무차원 반사도 값으로 변환시킨 자료로서 Eq. (5)에서 독립변수를 의미한다. 본 연구에서는 각 인자별 다중회귀식을 유도하기 위해 상관성이 높았던 위성의 밴드간 조합을 통해서 최적의 회귀식을 산정하였다. 산정된 회귀식을 통한 예측값과 현장실측값을 통계적

으로 비교하기 위해서 Bias와 RMSE를 사용하였는데 각각의 사용된 수식은 다음과 같다.

$$Bias = \frac{1}{n} \sum (X_{measured} - Y_{estimated}) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_{measured} - Y_{estimated})^2}{n}} \quad (7)$$

여기서,  $X_{measured}$ 는 WQPs의 현장실측값을 의미하며,  $Y_{estimated}$ 는 Landsat 8위성을 통해 산출된 예측값, n은 연구지점의 수이다. 따라서 Bias, RMSE는 실측값에 대한 예측값의 오차로서 두 변수간의 정밀도를 확인하기 위해 본 연구에서 사용하였다.

## 4. 연구결과 및 토의

### 4.1 다중회귀식 산정 및 검증

Table 3은 Landsat 8의 11개 밴드 중 선별된 각각의 밴드의 반사도 값과 실제 수질 자동측정기기에서 취수된 실측 농도값과의 상관관계를 나타낸 것이다. 선행연구결과에서는 총질소, 총인 모두 band5를 제외한 RGB (red, green, blue) 밴드에서 좋은 상관관계를 보였다. 특히, 총질소의 경우 band3 (green)에서 0.6 이상( $p < 0.01$ )의 가장 높은 상관성을 보였다. 비교적 상관성이 낮았던 band2 (blue)도 유의수준 0.05에서 0.48을 보임으로써 금강유역에서 총질소와 Landsat 8의 RGB밴드 사이에 상당히 상관성이 있음을 확인할 수 있었다.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)와 같은 식생지수를 측정하는데 있어 RGB밴드보다 더 정확한 것으로 알려져 있는(<http://landsat.gsfc.nasa.gov>) 근적외선 band5의 경우에는 총질소, 총인의 상관계수가 모두 유의수준(0.05 이하) 범위에 미치지 못함으로써 본 연구에서는 두 인자를 탐지하는데 좋은 결과를 나타낼 수 없어서

Table 3. Correlation between in Situ Measurements and Reflectance Value of each Selected Band

	Band2	Band3	Band4	Band5	TN	TP
Band2	1					
Band3	0.74**	1				
Band4	0.89**	0.87**	1			
Band5	0.43*	0.24	0.58**	1		
TN	0.48*	0.62**	0.57**	0.29	1	
TP	0.59**	0.58**	0.58*	0.08	0.80**	1

다중회귀식 산정 시 고려하지 않았다.

총질소는 상관성이 가장 높았던 band3번을 위주로 band간 조합을 통해 다양한 회귀식을 유도하였다. 구축된 다중회귀식들은 우선적으로 유의수준 여부를 판별하였으며, 유의성 범위에 있는 여러 식들 중 가장 높은 상관계수 (R)를 보인 회귀식을 두 인자에 관한 최적 회귀식으로 선별하였다.

총인의 경우, 유의수준 0.01 범위 안에서 band2, band3, band4와 각각 0.59, 0.58, 0.58의 값을 보임으로써 모든 RGB밴드에서 거의 동일한 상관성을 보였다. 그중에서 band 2와 가장 높은 상관성(0.59)을 보였는데, 이러한 결과는 Song et al. (2011) 연구결과에 비해서는 상관성이 결여되어 있는 것으로 나타났지만 대략 0.45~0.52  $\mu\text{m}$  파장대에서 총인이 가장 민감하게 반응한다는 걸 확인할 수

있었다. 다중 회귀모델식을 구축하기 위해 총인 역시 다양한 밴드조합을 사용하였다. 회귀모델식을 산정하기 위해 총질소와 같은 검증절차를 거쳤으며, Table 4는 상관성이 높았던 밴드간 조합을 통해 유도된 회귀식들이다.

두 수질인자에 대한 각각의 유도된 회귀식을 활용하여 인자별로 예측된 농도값과 실측농도 값을 비교·분석하였다. Fig. 2는 각 지점의 반사도값을 다중회귀식에 적용시켜 산정된 수질인자의 예측값과 실측값의 관계를 1:1 line에 나타낸 것이다. 총질소의 실측값이 2 mg/L이하에서는 1:1 line을 기준으로 예측값과 거의 일치하는 경향을 보였으나 실측값이 2 mg/L를 초과하면 예측값들이 실측값보다 약간 낮게 산정되었다. 총질소의 Bias는 -0.01 mg/L, RMSE는 0.73 mg/L를 나타냄으로써 비교적 높은 정확성을 보였다.

Table 4. Derived Multiple Regression through Band Combinations

Water quality parameters	Derived multiple regression	R
Total nitrogen	= -0.18 - 8.895×B2+31.156×B3+16.097×B4 (*)	0.63
	= -0.052+0.765×B2+0.409×B3	0.58
	= -0.048+0.956×B2+0.161×B4	0.56
Total phosphorus	= -0.062+0.901×B2+0.714×B3-0.287×B4 (*)	0.63
	= -0.041+0.606×B3+0.526×B4	0.60
	= -0.049+0.756×B2+0.447×B4	0.59

(\*) is the selected optimal regression model

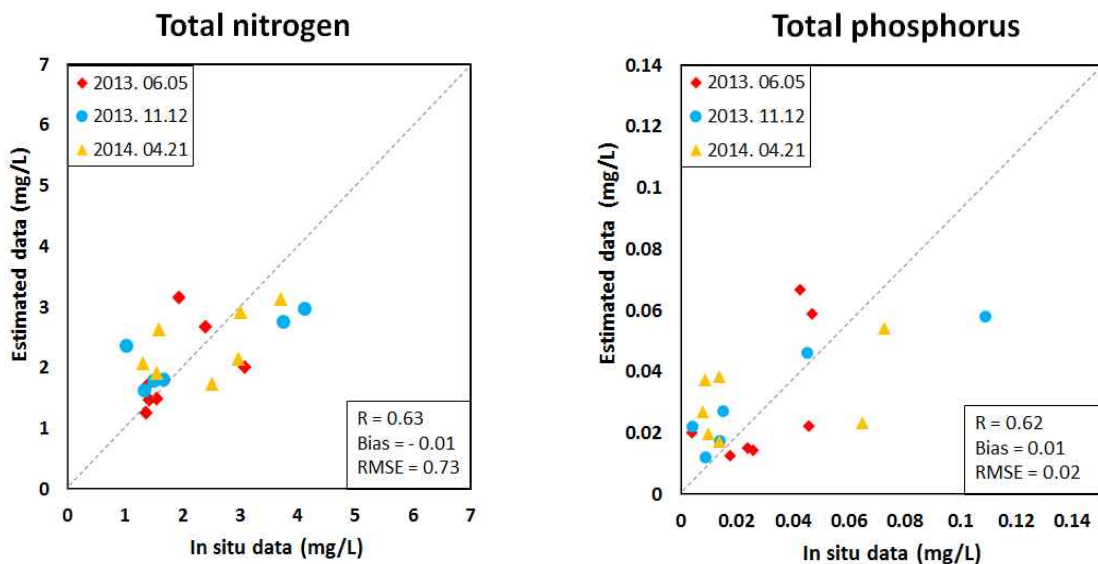


Fig. 2. Comparison between Estimated Value and in Situ Measurement



세 개 날짜에 해당하는 총인의 실측 농도값은 0.01~0.12 mg/L 범위에서 관측되었고 위성을 통한 예측값은 약 0.01~0.07 mg/L 안에서 형성되었다. 총질소와 마찬가지로 총인 역시 실측값들이 낮은 경우 예측값들과 1:1 line에 잘 분포되었으나 실측값이 높았던 경우에는 예측값들이 다소 낮게 산정되는 결과를 보였다. 이러한 현상은 연구된 날짜와 무관하게 남면과 부여지점에서 공통적으로 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 두 지점 모두 채수지점이 육지에 인접해 있거나 하천을 이루고 있는 주변환경이 도시나 평야로 둘러싸여 이들로부터 배출되는 다양한 형태의 입자상 물질들이 위성의 반사도가 낮게 산정되는 것에 영향을 미친 것으로 추정된다. 총인의 Bias와 RMSE는 각각 0.01 mg/L, 0.02 mg/L로 나타났다.

일부 지점들에서 총질소와 총인의 예측값들이 실측값과 1:1 line에 정확하게 일치하지 않았다. 이러한 이유는 수질자동측정기기를 통해 채취된 시료채취수심과 태양 복사에너지가 반사되는 수심이 정확히 일치하지 않고, 전처리 작업에서 생긴 센서수준의 오차 때문으로 추정할 수 있다(Chi, 2013).

#### 4.2 수질인자의 시·공간 분포양상

통계적 기법과 다중회귀분석을 통하여 얻어진 회귀식을 적용하여 각 수질인자에 대해 모니터링을 실시하였다. 두 수질인자의 시간에 따른 농도의 변동성을 확인하기 위해 2013년 11월 12일 (Figs. 3 and 5)과 2014년 4월 21일 (Figs. 4 and 6)로 분류하였다. 또한 공간분포에 대한 비

교·분석을 위해서 금강에 속하는 대청호(Figs. 3(a), 4.(c), 5(e), 6(g))와 금강하구둑 부근의 하류(Figs. 3(b), 4.(d), 5(f), 6(h))에 대해 도시하였다.

11월 12일과 4월 21일의 총질소, 총인의 공간분포 패턴은 시각적으로 확인할 만큼 세분화 되었다. 대청호 부근과 금강하류에서의 총질소, 총인 농도차이는 각각 약 1.00 mg/L, 0.03 mg/L 보였다. 특히, 하류의 각 보가 설치된 지점에서 총질소와 총인 농도가 모두 높은 것을 확인할 수 있었는데, 이는 보와 같은 시설물로 인해 유속이 현저히 감소하여 하천수가 정체됨에 따라 영양염류의 수체 체류시간을 증가시켜 총질소와 총인의 농도에 영향을 미친 것으로 추정된다. 또한 하류권역 근처에는 대청호에 비해서 두인자 모두 농도편차가 크게 나타났는데, 이는 비점오염원에서 방출되는 농·축산폐기물 및 가정폐수에 포함된 영양물질의 합류가 총질소와 총인의 농도값을 현저히 증가시킨 것으로 판단된다. Table 5는 환경부 산하 국립환경과학원의 물환경정보시스템에서 명시된 호소수 수질환경기준이다.

금강은 하천수지만 호소 수질환경기준을 적용한 것은 하천수 수질환경기준에는 총질소와 총인의 기준이 명확히 명시되어 있지 않고, 대청호의 경우 금강의 일부이지만 그 자체로도 호소수 형태를 띄고 있기 때문이다. 2014년 4월 21일에 총질소는 대청호유역과 하류 모두 각각 최대 3.5 mg/L, 5.0 mg/L 이하였는데 이를 호소수 수질기준에 적용했을 시, 수질 VI등급으로 판명되었다. 총인은 동기(2014,04,21)에 각각 최대 0.04 mg/L, 0.08 mg/L를 나

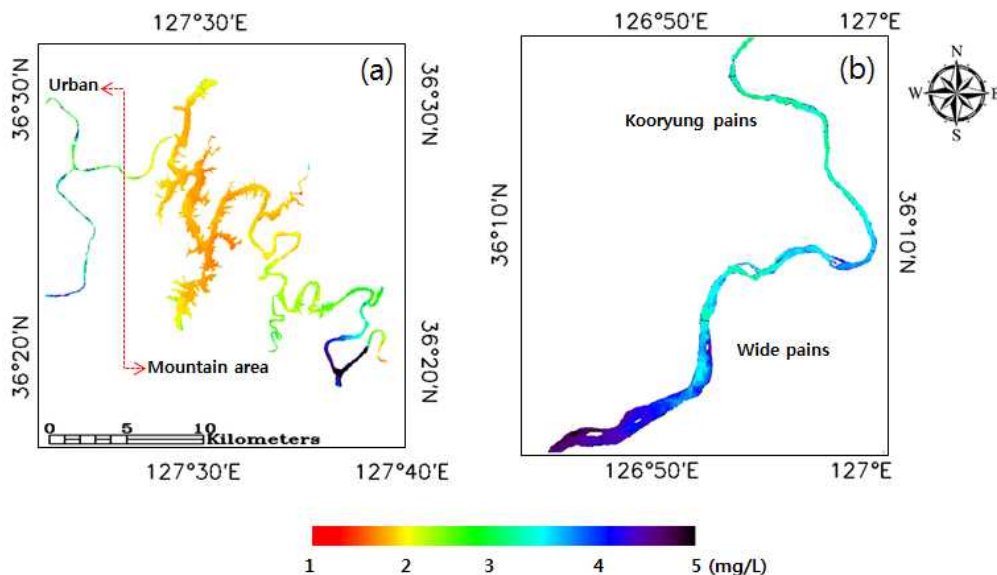


Fig. 3. Spatial Pattern of Total Nitrogen in Daechung Lake (a) and Downstream (b) on November 12, 2013



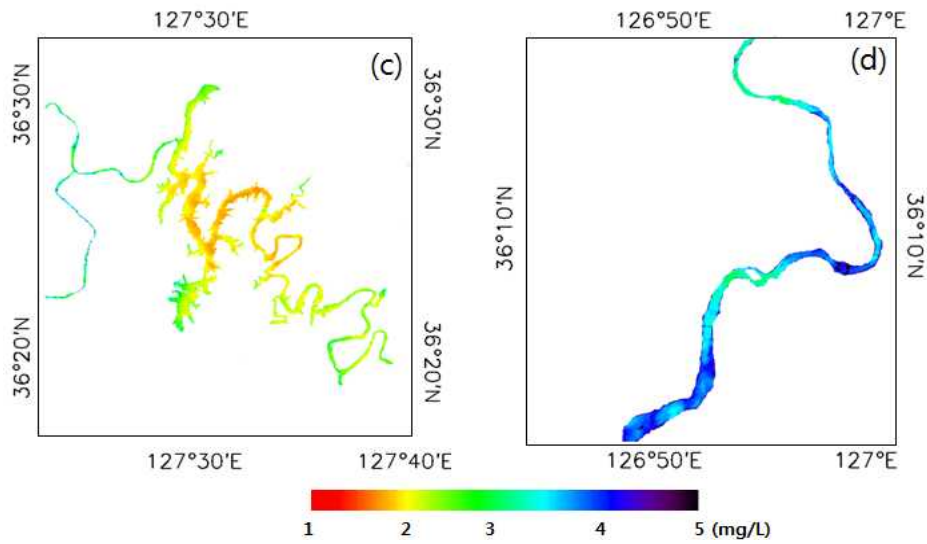


Fig. 4. Spatial Pattern of Total Nitrogen in Daechung Lake (c) and Downstream (d) on April 21, 2014

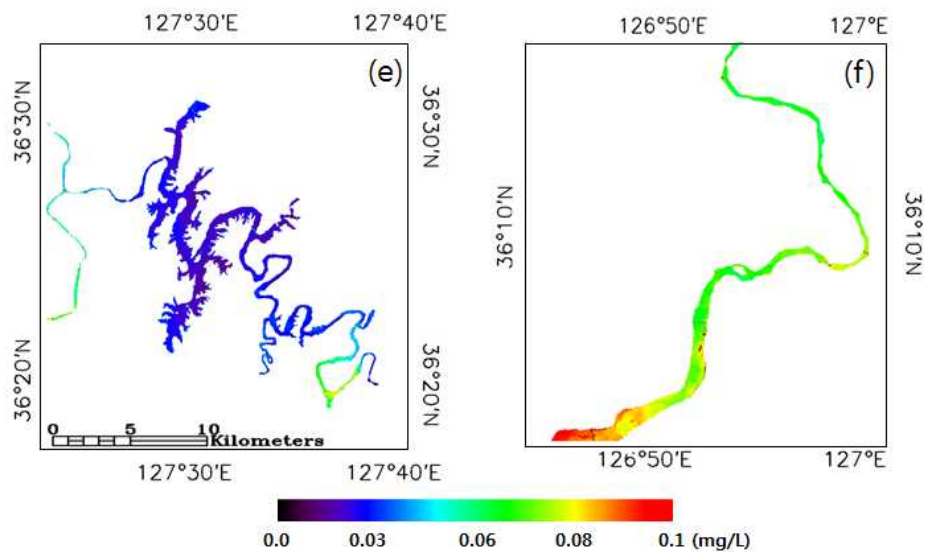


Fig. 5. Spatial Pattern of Total Phosphorus in Daechung Lake (e) and Downstream (f) on November 12, 2013

Table. 5 Water Quality Standard of Lake Type (<http://water.nier.go.kr/>)

Rank	Standard	
	Total nitrogen (mg/L)	Total phosphorus (mg/L)
Ia	0.2 $\geq$	0.01 $\geq$
Ib	0.3 $\geq$	0.02 $\geq$
II	0.4 $\geq$	0.03 $\geq$
III	0.6 $\geq$	0.05 $\geq$
IV	1.0 $\geq$	0.10 $\geq$
V	1.5 $\geq$	0.15 $\geq$
VI	1.5 $<$	0.15 $<$

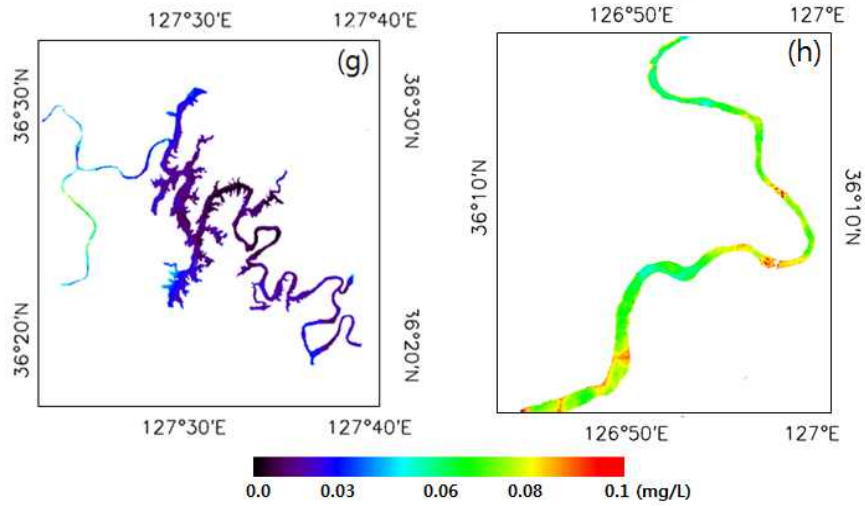


Fig. 6. Spatial Pattern of Total phosphorus in Daechung Lake (g) and Downstream (h) on April 21, 2014

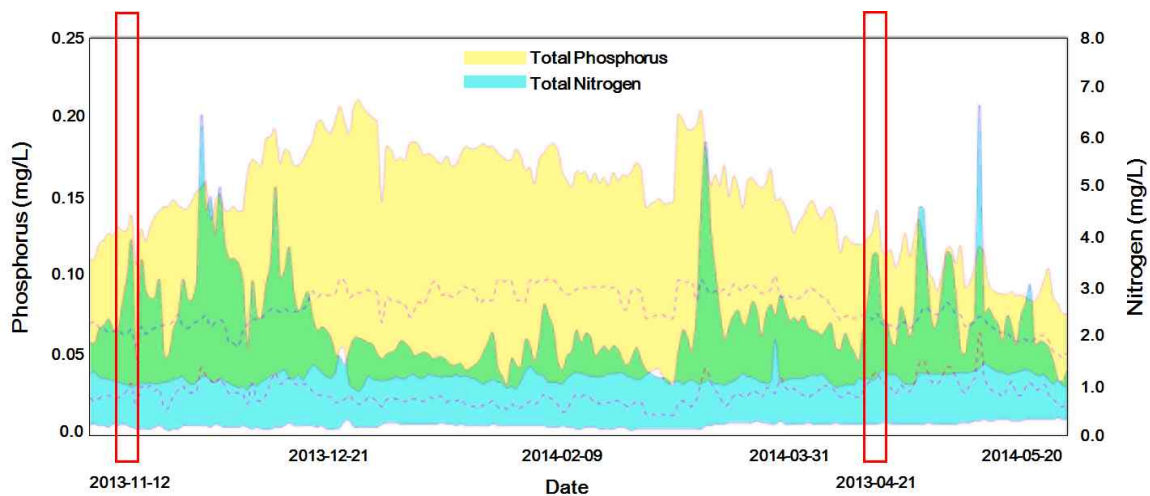


Fig. 7. Temporal Variability of Total Nitrogen and Total Phosphorus

타냄으로써 대청호는 III등급, 하류는 IV등급으로 판정하였다. 총인에 대한 총질소의 농도 비율이 7미만일 경우 총질소의 기준만을 고려하기 때문에, 최종적으로 두 지역 모두 모두 수질 VI등급으로 판정하였다.

11월 12일과 4월 21일에 두인자의 시간적 변동성은 공간분포 패턴에서와 마찬가지로 유사한 경향성을 나타내었다. 현도지점의 경우 11월 12일에 총질소와 총인은 각각 1.77 mg/L, 0.02 mg/L였으며, 4월 21일에는 2.07 mg/L, 0.03 mg/L이었다. 이러한 이유로는 앞선 4.1절에서 Pearson 상관분석을 통해 총질소와 총인이 유의수준 0.01범위에서 0.80의 높은 상관성을 보였기 때문으로 판단된다. 또한 2013년 11월 1일부터 2014년 5월 31일까지 연구날짜를 포함한 수질자동측정기기로 측정된 7개 지점의 총질소와 총

인의 농도 경향성을 나타낸 그래프(Fig. 7)에서도 확인이 가능하다. Fig. 7에서 노란색으로 표시된 부분은 총인에 대한 시간변동성, 파란색부분은 총질소의 시간변동성을 의미한다. 녹색으로 나타난 부분은 총인과 총질소를 나타내는 두 색상(노란색, 파란색)이 이미지생성 과정에서 중첩되면서 나타났다. Fig. 7은 수질자동측정기기로 실제 측정된 두 인자의 농도값이 11월 12일과 4월 21일에 거의 일치함을 보여준다. 위 그래프에서 총질소의 최대 농도값은 6.74 mg/L, 최소 농도값은 0.89 mg/L, 총인의 경우 최대 농도값은 0.21 mg/L, 최소 농도값은 0.003 mg/L이었다. 또한 총질소와 총인의 평균 농도값은 각각 2.56 mg/L, 0.03 mg/L였다. 우리나라 대부분의 하천들은 겨울철을 제외하고는 총인의 농도가 0.03 mg/L를 초과하여 녹조발생

의 우려가 있다. Fig. 7에서는 겨울철의 총인농도를 고려한 평균값들이기 때문에 다소 낮은 수치를 보여주었다.

시·공간적인 분석을 통해서 본 연구에서는 영양물질(총질소, 총인)이 시간의 변동성 보다는 산업시설, 농경지, 주거지역과 같은 강을 둘러싸고 있는 주변 환경의 영향이 더 지배적인요인이라고 판단할 수 있었다. 또한, 인공위성 영상자료를 활용한 mapping 통해 녹조발생의 지배적인 인자인 총질소와 총인의 농도분포양상을 시각적으로 확인할 수 있었고 금강하류에서 녹조가 발생할 수 있는 잠재적 지점을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 대한민국 하천의 수질관측을 위해 Landsat 8 위성의 잠재적 적용성을 평가해보았다. Landsat 8 위성 과 금강을 대상으로 한 영양물질(총질소, 총인)과의 상관관계 결과 총질소의 경우 유의수준 0.05 안에서 band2, band3, band4와 각각 0.48, 0.62, 0.57로 높은 상관관계를 보였으며 총인의 경우 band2, band3, band4 와 유의수준 0.01 안에서 각각 0.59, 0.58, 0.58을 나타냈다.

상관성이 높은 band간의 조합을 통해 총질소와 총인에 관한 최적의 다중회귀식을 산정할 수 있었다. 유도된 회귀식을 검증하기 위해 예측값과 실측값을 비교 분석해본 결과 두 수질인자 모두 1:1 line에 잘 분포됨으로써 전반적으로 높은 정확성을 지니는 것으로 나타났다. 총질소의 Bias는 0.01 mg/L, RMSE는 0.73 mg/L, 총인은 Bias와 RMSE는 각각 0.01 mg/L, 0.02 mg/L였으며, 오차는 긍정적으로 수용할만한 결과라고 판단된다.

선별된 두 날짜 (2013.11.12., 2014.4.21)에 대해 총인의 공간분포 패턴은 총질소와 유사한 경향성을 보였는데 이는 두 인자사이에  $R=0.8$  이상의 상관성을 보이기 때문이다. 이런 결과는 실측자료에서도 확인이 가능했고, 두 수질인자들의 농도가 높았던 지점들 역시 대부분 일치하는 경향성을 보였다. 금강하류에서는 시간의 변동성(11월 12일, 4월 21일)과 무관하게 상류의 농도보다 약 2배 정도 높은 농도차이가 발생했다.

본 연구 결과들을 통해 Landsat 8 위성은 대한민국의 하천 수질측정에 있어서 활용 가능한 위성이었으며 금강의 총질소와 총인을 대상으로 다중회귀식을 제안함으로써 위성 자료를 통해 녹조발생에 취약한 지점을 확인하는 것이 가능하였다. 하지만 수질인자들의 농도측정에 관련된 상관관계 결정시, band5번의 경우 두 수질인자와 모두 낮은 상관성을 보였기 때문에 인공위성 영상자료를 활용

할 경우에 밴드의 선별과 조합이 요구된다.

위성의 촬영주기를 개선하기 위한 알고리즘이 개발되거나 촬영주기가 다른 위성간의 조합을 활용한다면 좀 더 상세한 회귀식이 도출 될 것으로 판단한다. 시간별 실측 수질데이터 양이 충분히 확보되거나 현장에서 radiometer 기기를 사용한 수체의 스펙트럼을 직접 측정은 밴드와 인자간의 상관관계를 더욱 확실하게 정의할 수 있으며 유도된 회귀식의 정확성을 더욱 향상시킬 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 : No. 2014M1A3A3A03067387).

## References

- Bilge, F., Yazici, B., Dogeroglu, T., and Ayday, C. (2003). "Statistical evaluation of remotely sensed data for water quality monitoring." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 24, No. 24, pp. 5317-5326.
- Bolgrien, D.W., Granin, N.G., and Levin, L. (1995). "Surface temperature dynamics of Lake Baikal observed from AVHRR images." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61, No. 2, pp. 211-216.
- Chacon-Torres, A., Ross, L., Beveridge, M., and Watson, A. (1992). "The application of SPOT multispectral imagery for the assessment of water quality in Lake Patzcuaro, Mexico." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 13, No. 4, pp. 587-603.
- Chavez, Pat S. (1996). "Image-based atmospheric corrections-revisited and improved." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 62, No. 9, pp. 1025-1035.
- Chi, J.H. (2013). "Validation of the Radiometric Characteristics of Landsat 8 (LDCM) OLI Sensor using Band Aggregation Technique of EO-1 Hyperion Hyperspectral Imagery." *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 4, pp. 399-406.
- Dekker, A., Zamurović-Nenad, Ž., Hoogenboom, H., and Peters, S. (1996) "Remote sensing, ecological water quality modelling and in situ measurements: a case study in shallow lakes." *Hydrological Science Journal*,

- Vol. 41, No. 4, pp. 531-547.
- Dekker, A.G., Vos, R., and Peters, S. (2002). "Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, No. 1 pp. 15-35.
- Giardino, C., Pepe, M., Brivio, P.A., Ghezzi, P., and Zilioli, E. (2001) "Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery." *Science of Total Environment*, Vol. 268, No. 1, pp. 19-29.
- Kim, T.G., Kim, K.E., Cho, G.S., and Kim, H.G. (1996). "Monitoring of Lake Water Quality using Landsat TM Imagery Data." *Journal of the Korean society for geospatial Information System*, Vol. 4, No. 2, pp. 23-33.
- Kim, T.W., Shin H.S., and Seo, Y.C. (2014). "Airborne Hyperspectral Imagery availability to estimate inland water quality parameter." *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 1, pp. 61-73.
- Lillesand, T.M., Johnson, W.L., Deuell, R.L., Lindstrom, O.M., and Meisner, D.E. (1983). "Use of Landsat data to predict the trophic state of Minnesota lakes." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 2, pp. 219-229.
- Matthews, M.W., Bernard, S., and Winter, K. (2010). "Remote sensing of cyanobacteria-dominant algal blooms and water quality parameters in Zeekoewlei, a small peritrophic lake, using MERIS." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, No. 9, pp 2070-2087.
- Nam, G.S., Song, Y.H., Lee, E.H., Hong, D.B., and Han, M.S. (2011). "Property of Water Environment and Evaluation of Zooplankton as Predators for the Control of Algal Bloom in the Agricultural Reservoir." *Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, Vol. 18, No. 1, pp. 33-43
- Nas, B., Ekercin, S., Karabork, H., Berkay, A., and Mulla, D.J. (2010). "An application of Landsat-5TM image data for water quality mapping in Lake Beysehir, Turkey." *Water Air and Soil Pollution*, Vol. 212, No. 1-4, pp. 183-197.
- Park, J.H., Lee, G.S., Yang, J.S., and Kim, S.W. (2012). "A Hydrometeorological Time Series Analysis of Geum River Watershed with GIS Data Considering Climate Change." *Journal of Korea Spatial Information*, Vol. 20, No. 3, pp. 39-50.
- Park, S.H., Lee, M.J., and Jung, H.S. (2012). "Analysis on the snow cover variations at Mt. Kilimanjaro using Landsat satellite images." *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, pp. 409-420
- Song, K., Wang, Z., Blackwell, J., Zhang, B., Li, F., Zhang, Y., and Jiang, G. (2011). "Water quality monitoring using Landsat Thematic Mapper data with empirical algorithms in Chagan Lake." *Chinese Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 5, No. 1, pp. 053506-053516, doi:10.1117/1.3559497.
- Sudheer, K., Chaubey, I., and Garg, V. (2006). "Lake water quality assessment from Landsat thematic mapper data using neural network: an approach to optimal band combination selection." *Journal of American Water Resource Association*. Vol. 42, No. 6, pp. 1683-1695.
- Wang, F., Han, L., Kung, H.T., and Van Arsdale, R.B. (2006). "Applications of Landsat-5 TM imagery in assessing and mapping water quality in Reelfoot Lake, Tennessee." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 23, pp. 5269-5283.
- Wu, C., Wu, J., Qi, J., Zhang, L., Huang, H., Lou, L., and Chen, Y. (2010). "Empirical estimation of total phosphorus concentration in the mainstream of the Qiantang River in China using Landsat TM data." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 31, No. 9, pp. 2309-2324.

paper number : 14-118

Received : 2 December 2014

Revised : 2 January 2015

Accepted : 2 January 2015