속 보

천리안 해색위성 GOCI를 이용한 일본 동부 지진해일 영향 연구

손영백 · 유주형[†]

한국해양연구원 해양위성센터

Preliminary Study of the Tsunami Effect from the Great East Japan Earthquake using the World First Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)

Young Baek Son and Joo Hyung Ryu[†]

Korea Ocean Satellite Center, KORDI

Abstract : The enormous disaster (Friday nightmare) occurred at 14:46 (JST) (05:46 UTC) on 11 March 2011, officially named “the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami”. To monitor the variations of the marine environment after the earthquake, we used chlorophyll and Rrs(555) of GOCI and MODIS ocean color satellite data during March ~ May 2011. Before the earthquake, chlorophyll and Rrs(555) were relatively low around the Sendai areas. After the earthquake, their concentration and intensity were suddenly increased along the coast and the water column was disturbed by the tsunami wave. The severe distortions influenced by the tsunami occurred at less than 30 m water depth and the variations in offshore were difficult to discern the effect of the tsunami. The disturbance by the tsunami was still remained in the terrestrial environment after one month. However the ocean environment returned to the former condition in almost two month later.

Key Words : GOCI, MODIS, Tsunami, Great East Japan Earthquake, ocean color

요약 : 2011년 3월 11일 14시 46분 (JST) 일본 센다이에서 동쪽 152 km 지점에서 수심 32 km 지점에서 (38.222° N 142.369° E) 진도 9.0의 대지진이 (공식명칭: The 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami) 발생했다. 지진해일 발생 후 센다이를 포함하는 주변해역에서 해양환경의 변화를 모니터링 하기 위해서 해색위성인 GOCI 및 MODIS에서 추출된 클로로필과 Rrs(555)을 이용하여 2011년 3월에서 5월까지 모니터링을 실시 하였다. 지진해일 발생 전 센다이 주변해역 및 일본 동부 해안은 상대적으로 낮은 농도의 클로로필과 부유물질 농도를 보였지만, 지진해일 발생 후 지진해일의 영향은 일본 동부 남북방향의 긴 해안선을 따라서 전 지역에서 영향을 미쳤고, 수층이 교란되었다. 급격한 변화는 수심 30 m 이내의 얇은 수심에서 일어났고, 외해에서의 변화는 거의 없었다. 지진해일 발생 두 달 후 이전의 안정된 해양환경으로 복원된 것으로 관측되었다.

접수일(2012년 3월 4일), 수정일(1차 : 2012년 3월 27일), 게재확정일(2012년 4월 4일).

[†] 교신저자: 유주형(jhryu@kordi.re.kr)

1. 서론

공식적인 명칭이 “The 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami” 또는 “Great East Japan Earthquake” 인 진도 9.0의 대지진이 2011년 3월 11일 오후 2시 46분 (05시46 UTC) 일본 동북부 지역에서 일어났다. 일본기상국(Japan Meteorological Agency, JMA)의 발표에 의하면 진앙은 Tohoku의 Oshika 반도에서 동쪽으로 77km 해상에서(센다이(Sendai) 동쪽 152 km) 발생했고, 진원지는 수심 32 km 된다고 보고하였다(38,222° N 142.369° E) (JMA, 2011; Norio *et al.*, 2011). 이 지진은 1900년 이후 세 번째로 큰 지진으로 기록되었다(JMA, 2011). 7번의 전진(foreshock)과 1,000 이상의 후진(aftershock)이 북쪽 Honshu의 태평양 판에서 발생했다. USGS 및 NASA 과학자들의 결과를 인용하면 Honshu는 3.6 m 동쪽으로 이동했고, 지구의 축이 ~25 cm 움직이고 일본 동부 해안이 0.6 m 침하 한 것으로 보고되었다(CBS News, 2011; Chai, 2011; Chang, 2011).

이 대지진은 일본 동부 지역을 강타했고 이로 인한 피해뿐만 아니라 지진해일(tsunami)이 가세되면서 더 많은 피해가 발생했다(Japan National Police Agency, 2011; Norio *et al.*, 2011). 지진해일은 일본 동부 연안뿐만 아니라 태평양을 가로질러 전파된 것으로 보고되었다(Mimura *et al.*, 2011; NOAA, 2011). 첫 번째 지진해일은 진원지가 육지에서 77 km에 위치해서 Honshu 연안에 지진 발생후 10~30분 후에 빠르게 도달했다(Minura *et al.*, 2011). 지진 발생 1시간 후 센다이(진원지로부터 ~160 km 떨어진 도시) 공항에 설치된 카메라는 거대한 지질해일이 공항뿐만 아니라 주변 지역을 휩쓸고 지나가는 영상이 포착되었다(The Aviation Herald, 2011). JMA은 지진해일이 일본 동부 연안에 3~20 m 이상의 파고를 가지고 10 km 이상 육지로 밀려 들어온 것으로 보고하였다(Fig. 1, Table 1, Minura *et al.*, 2011). 특히 일본 동부 지역은 남북 방향으로 670 km의 긴 해안선을 가지고 있어서 더 많은 피해가 발생했고, 총 470 km² 이상의 면적이 영향을 받았다(Norio *et al.*, 2011). 엄청난 사상자와 정신적 물적 피해는 대지진에 의한 효과뿐만 아니라 지진해일에 의한 영향으로 발생한 거대 물 덩어리가 forewash 및

Table 1. Peak Tsunami wave height and locations

	Location	Tsunami Wave Height (m)
Hokkaido	Nemuro	2.8
	Hamanaka	2.6
	Port of Tokachi	>2.8
	Erimo	3.5
	Hakodate	2.4
	Tomakomai East Port	>2.5
	Ishikari New Port	0.4
Aomori	Mutsu	2.9
	Port of Hachinohe	>5.0
Iwate	Miyako	>8.5
	Kamaishi	>4.1
	Ōfunato	>8.0
	Port of Ōfunato	Run up height >24
	Port of Kuji	>8.0
Miyagi	Ishinomaki	>7.6
	Fishery port of Onagawa	15
	Ayukawa(Ishinomaki-shi)	>3.3
	Port of Ishinomaki	5.0
	Shiogama-Sendai port	>4
	Sendai Airport	Run up height >12
	Fukushima	Sōma >9.3
	Onahama	3.3
	Ibaraki	Ōarai 4.2
	Chiba	Chōshi 2.4
Tokyo	Chiba	0.9
	Tateyama	1.6
	Harumi	1.3
Kanagawa	Yokohama	1.6
	Yokosuka	1.6
Shizuoka	Numazu	1.4
	Shimizu	0.9
	Omaezaki	1.4
Aichi	Tahara	1.6
	Nagoya	1.0
Mie	Toba	1.8
	Owase	1.7

backwash 효과에 의해서 많은 피해를 주었다. 2004년 인도양에서 발생한 진도 9.3의 지진에 의해서 발생한 지진해일 피해도 위와 유사했다(Chadha *et al.*, 2005; Tan *et al.*, 2007). 지진 발생 이후 접근이 용이하지 않은 지역에 대해서 원격탐사를 이용한 피해 지역에 대한 촬영이 시도 되었고, 전세계 사람들에게 피해의 심각성을 알렸다(Guo *et al.*, 2011; The Aviation Herald,

Table 1. Continued

Location		Tsunami Wave Height (m)
Wakayama	Kushimoto	1.4
Osaka	Osaka	0.6
Tokushima	Komatsushima	0.7
Kochi	Port of Susaki	2.6
Ōita	Ōita	0.4
Miyazaki	Port of Miyazaki	1.8
Okinawa	Naha	0.6
Nagasaki	Nagasaki	0.8
Fukuoka	Hakata	0.3
Hiroshima	Kure	0.3
Fukui	Tsuruga	0.3
Ishikawa	Kanazawa	0.2
Niigata	Niigata	0.2
Yamagata	Sakata	0.4

2011).

지진이 일어나게 된 지질학적 배경 및 이후 어떤 변화가 일어났는지에 대한 대부분의 연구가 수행되었지만(Ide *et al.*, 2011; Norio *et al.*, 2011; Sato *et al.*, 2011), 피해지역의 특성상 해상 접근이 용이하지 않아서 해양환경의 변화에 대해서는 많은 연구들이 수행되지 못했다. 본

연구는 세계 최초 정지궤도 해색위성인 Geostationary Ocean Color Imager(GOCI) 및 NASA Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 해색위성을 이용하여 지진해일에 의한 해양환경의 변화를 관찰하기 위한 선행 연구로, 지진해일 전/후에 해양에서 어떤 변화가 발생했는지 모니터링 하였다.

2. 재료 및 방법

해색 위성센서 GOCI와 MODIS 자료는 지진해일 전/후의 변화를 관측하기 위해서 2011년 3월부터 5월까지 일일 자료를 처리하였다(34.60° – 40.50° N, 139.50° – 143.00° E, Fig. 1). GOCI (Level 1b; 500 m 공간해상도) 자료는 한국해양연구원 해양위성센터(KOSC)의 자료를 이용하였다(조성익 외, 2010). Level 1b 자료는 true color (Red:660 nm, Green:555 nm, Blue: 443 nm) 영상을 제작하고, GDPS(GOCI Data Processing System)에 의해서 Level 2 자료인 클로로필 농도 및 remote-sensing reflectance(Rrs) 추출해 내었다(한

Fig. 1. Map of the study area. The X indicated the epicenter of the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami. The tsunami impact location and wave height (see Table 1).

희정 외, 2010). MODIS(Level 2, 1 km 공간해상도) 일별 자료는 연구지역에 맞도록 SeaDAS(SeaWiFS Data Analysis System)를 이용하여 1 km 해상도를 가지는 SMI(Standard Mapped Image) 자료로 처리하여, 클로로필 농도 및 Rrs 자료를 획득했다(McClain *et al.*, 2004).

GOCI와 MODIS 클로로필 농도는 두 위성간의 차이를 줄이기 위해서 MODIS 표준 클로로필 알고리즘 OC2를 이용하여 계산되었다(O'Reilly *et al.*, 2000). 연구지역의 부유물질 농도는 기존의 여러 알고리즘에 개발된 방법대신 부유물질과 밀접한 관계를 가지는 Rrs(555)의 하나의 밴드를 이용하였다(Davis *et al.*, 2000; Ahn *et al.*, 2001). GOCI 표준 부유물질 알고리

즘은 하나의 밴드를 이용하여 계산된 값이다(Ahn *et al.*, 2001). 그리고 두 위성간의 차이를 줄이기 위해서 MODIS 해색위성이 촬영된 시간과 근접한 GOCI 위성 자료를 이용하여 비교하였다.

첫 번째, GOCI level 1b 자료는 true color 영상을 만들어 지진 발생 전/후 변화를 관측하였고, 500 m 공간해상도를 가지는 해색위성이지만 지진해일에 의한 해안선의 변화를 계산하였다. 두 번째, GOCI 및 MODIS의 클로로필과 Rrs(555) 자료는 지진해일에 영향을 받은 지역을 파악하고, 이전의 상태로 복원되기까지 해양 환경 변화를 모니터링 했다. 세 번째, 해양환경 변화는 특히 센다이 지역을 중심으로 주변해역에 대해서 중점적으로 클로로필과 부유물질 변화를 조사하였다.

Fig. 2. The true color composites before (March 9, 2011) and after (March 12, 2011) the tsunami (upper). The true color composites on March 12, 2011 showed the fire smoke movement and discolored water column affected from the tsunami through 9 to 16 hour (bottom).

3. 결 과

1) 일본 동부 대지진 전/후 GOCI 영상 비교

Fig. 2은 일본 동부 대지진이 일어나기 전인 2011년 3월 9일 영상과 지진 발생 후 하루가 지난 2011년 3월 12일의 true color 영상이다. 지진해일 발생 전 연구지역은 연안이나 외해에서 큰 변화가 없는 안정된 환경을 나타내지만, 지진발생 다음날 GOCI 영상에서 다양한 변화가 관측되었다. 첫 번째, 화재로 인한 연기는 지진의 피해를 입었던 지역의 육상에서 수백 km까지 퍼져 나가고 있는 것이 영상에서 확인되었다. 센다이 지역에서는 검은 연기가 연속적으로 동쪽으로 퍼져 나가고, 2011년 3월 13일 영상에서도 동일하게 확인되었다. 두 번째, 탁도의 변화가 일본 동부지방 연안을 따라서 발견되었다. 증가된 부유물질 변화는 강도의 차이는 있지만 연구지역 남-북 방향으로 전 영역에 걸쳐 변화가 관측되었다. 지진해일이 연안에 접근하면서 퇴적물을 재 부유 시키거나, 육상으로 밀려온 해수가 후퇴하면서 탁도의 변화가 일어났다(Noda *et al.*, 2007; Tan *et al.*, 2007). 세 번째, 해안선의 변화가 GOCI 영상에서 감지되었다(Fig. 3). GOCI 해상위성은 500 m의 공간해상도를 가지고 있기 때문에 고해상도의 위성에서 보이는 육상의 자세한 변화는 감지하기 힘들지만, 넓은 지역에 대한 변화는 실시간 감시가 가능하다. Fig. 3은 회색의

육지와 검은색의 바다를 대비하여 연구지역의 해안선을 잘 나타내고 있다. 지진이 발생 전 2011년 2월 23일 센다이 지역은 회색으로 육지를 지시하고, 지진 발생 후 이틀이 지난 2011년 3월 13일 육지 부분이 검은색으로 변화되었다. 지진해일이 육상으로 밀려 들어 오면서 육지였던 부분이 해수에 의해 침수되었다. 이런 변화는 한 달이 지난 2011년 4월 17일 많은 부분이 지진 발생 전으로 복원되었지만, 침수되었던 부분들이 계속적으로 남아 있었다.

2) 지진해일에 의한 해양환경 변화

지진해일에 의한 해양환경 변화를 고찰하기 전에 일본 JMA에 보도된 지진해일의 영향을 먼저 살펴보면 (Fig. 1, Table 1) 지진해일은 일본 동부 연안을 따라 10 km 이상 육지로 밀려왔고 1-20 m 이상의 높이로 영향을 주었다. Aomori, Iwate, Miyagi, Fukushima, Ibaraki은 일본 동부 연안 지역 중에서 지진 발생 진원지로부터 근접되어 있어서 집중적으로 피해가 발생되었다. 그 이외에도 진원지로부터 먼 지역인 Hokkaido, Nagasaki, Yamagata 등 일본 전 전역이 약하지만 지진해일의 영향을 받았다. 지진해일 피해 지역은 남북 방향으로 670 km에 대해서 총 470 km² 이상의 면적에서 영향을 받은 것으로 보고되었다(JMA, 2011; Mimura *et al.*, 2011; Norio *et al.*, 2011).

본 연구에서는 지진해일이 일어났던 지역 중에서 센

Fig. 3. Coast line was changed from the influence of the tsunami impact.

다이를 중심으로 남북 ~700 km 지역에 대해서 해색위성을 이용해서 클로로필 변화와 부유물질 변화를 살펴 보았다(Fig. 4).

2011년 3월 5일은 지진이 발생 일주일 전으로, GOCI 및 MODIS 클로로필 농도의 변화는 연안 일부 지역을

제외하고 연안 및 외해에서 농도의 변화가 크지 않았고, Rrs(555)의 변화도 이와 유사한 경향을 보여주었다. 2011년 3월 11일 영상에서 클로로필 농도 변화는 전일 영상과 비교하여 큰 변화가 관측되지는 않았다. 이는 지진 발생 시간이 오후 ~15시경에 일어났고, 지진해일은

Fig. 4. Comparison between MODIS and GOCI chlorophyll and Rrs(555). The tsunami influenced along the east coast of the Japan and occurred the increased chlorophyll concentration and suspended matter.

Fig. 4. Continued.

이후 10분에서 몇 시간에 걸쳐서 발생 되었다. GOCI의 마지막 촬영 시간은 16시 30분이라서 3월 11일의 영상에서는 특이한 변화를 관측하지 못했다. 그러나 2011년 3월 12일 GOCI 클로로필 농도는 센다이 북부 지역은 구름으로 인하여 연안지역에 농도 변화를 관측하기 힘들었지만, 센다이를 포함하는 남부지역에서는 상대적으로 연안에서 농도가 증가되어 나타났다. 탁도를 지시하는 Rrs(555) 값은 외해의 비해서 절대적으로 증가되었다. MODIS 클로로필 농도는 구름 및 1 km 공간 해상도 때문에 연안의 변화는 감지되지 못했고, 외해에서 상대적으로 증가된 클로로필 변화를 보였다. 2011년 3월 13일 GOCI 및 MODIS 클로로필 농도는 전날인 3월 12일보다 전 영역에서 증가나타났고, 센다이 남부 및 외

해로 확장되었다. Rrs(555)는 연안에서 급격히 증가되었고, 영역도 넓어졌다. 2011년 3월 18일 지진 발생 1주일 후의 클로로필 농도 변화는 상대적으로 감소되었고, Rrs(555)는 센다이 부근 연안에서 여전히 높은 값을 보였다. 2011년 4월 17일 지진 발생 한달 후의 클로로필 및 부유물질의 변화는 두 위성에서 차이를 보이지만 증가되었던 부분들이 상당 부분 사라졌다. 2011년 5월 18일 지진 발생 두 달 후로 클로로필 및 Rrs(555)는 연안의 증가되었던 영역들이 대부분 사라졌다.

Fig. 4에서 해양에서 심각한 영향을 받았던 지역은 센다이를 중심으로 ~150 km 정도에 집중된 것으로 GOCI 및 MODIS 두 자료에서 확인되었다. 그러나 센다이 북부 지역은 구름으로 인하여 뚜렷한 변화를 감지

하지 못했고, 상대적으로 구름이 없었던 남부 지역에서 자세한 변화가 관측되었다. 그래서 이 부분에 대한 자세한 해양의 변화를 조사하기 위하여 동일한 날짜에 대해서 GOCI의 클로로필 및 Rrs(555)의 변화를 조사하였다(Fig. 5). 2011년 3월 11일은 구름으로 인하여 연안지역의 변화는 관측되지 않았고, 수직 및 수평 단면 변화에서 클로로필은 1 mg/m^3 이하의 낮은 일정한 농도를 보였다. Rrs(555)은 이와 유사하게 0.005 (1/sr) 이하로 일정한 범위에서 관찰되었다. 2011년 3월 13일 클로로필과 Rrs(555)의 변화는 지진해일이 연안에 전파되면서 수층을 교란시켰고, 특히 수심이 얇은 부분에서 많은 변화를 보였다. 클로로필 농도는 3월 11일에 비해 현저히 증가되었고, Rrs(555)은 또한 뚜렷한 증가를 보였다. 단면 변화에서 지진해일이 발생하여 5~13 km 지역에서 저수심 및 backwash에 의해서 많은 교란이 일어난 것으로 관측되었다(Noda *et al.*, 2007; Tan *et al.*, 2007). 2011년 3월 18일 지진 발생 일주일 지난 연구지역에서는 육지에 근접한 부분에서 여전히 높은 농도의 클로로필과 Rrs(555)을 보여주고 있다. 클로로필과 Rrs(555)은 전반적으로 외해에서 일주일전에 비해서 상대적으로 증가되어 나타났다. 2011년 4월 17일 연구지역은 연안의 일부 지역을 제외하고 안정된 상태로 돌아왔다. 외해에서 클로로필 농도는 증가되었지만, Rrs(555) 값의 변화는 상대적으로 작았다. 이런 결과는 지진해일에 의한 영향보다는 다른 요인에 의한 것으로 사료된다. 2011년 5월 18일 지진 발생 두 달 후 연안 및 외해는 지진 발생 전의 환경으로 전환되었다.

4. 토 의

본 연구는 일본 동부 지진 발생 지역에 GOCI 및 MODIS 두 해색위성을 이용하여 해양환경 변화를 추적하였다. 첫 번째, 지진해일이 어느 범위까지 영향을 미쳤는지, 두 번째, 지진해일에 의한 해양환경의 변화, 세 번째, 지진해일에 의한 영향이 해양에서 안정화 되는 과정으로 구분하여 고찰해 보았다.

첫 번째, 세계 최초 정지궤도 해색위성인 GOCI는 일본 동부 대지진이 발생한 시점에서 계속적인 모니터링을 실시하였고, 특히 해양환경의 변화에 집중적으로 모

니터링 하였다. 대지진에 의해 발생한 지진해일은 일본 동부 연안에 많은 영향을 주었다(JMA, 2011; Mimura *et al.*, 2011; Norio *et al.*, 2011). 이런 원인은 일본 동부 연안이 남북으로 길고 넓게 발달되어 있고, 수심이 급격히 얕아 지는 해안의 특징 때문이다(Fig. 1). 그래서 장주기의 특징을 가지는 지진해일은 천해로 진입하면서 높은 파고를 가지고 해안의 저지를 침범하면서 많은 피해를 주었다(GUO *et al.*, 2011; Mimura *et al.*, 2011). 지진해일 발생 후 상대적으로 증가된 클로로필 및 탁도의 변화는 Iwata현에서 Chiba현까지 ~450 km 지역에서 나타났다(Figs. 2-5). 그 이외에도 지진해일의 영향은 홋카이도 지역까지 포함하면 더 넓은 범위에서 일어났다(Table 1). 지진해일은 해안을 침범하여 해안선 변화를 일으켰고 GOCI 해색위성에서 이런 변화를 관측되었고(Fig. 3), 지진해일의 파고가 상대적으로 높았던 지역과 일치한다(Fig. 1, Table 1). 그러나 해색위성에서 관측된 급격한 변화는 해안을 따라 얇은 수심에서 변화가 나타났고 수심이 깊은 외해 변화는 감지하지 못했다. 이런 부분은 true color 영상이나 위성에서 추정된 클로로필 영상에서 뚜렷하게 관찰되었다.

일본 동부 연안에서 한가지 관심을 가질 수 있는 부분은 지진발생 이후 외해에서 지진 발생 전보다 클로로필 농도가 증가되어 나타났다. 클로로필 농도는 지진해일에 의한 연안역의 교란에 의해서 유기물 또는 무기물의 재부유(Noda *et al.*, 2007; Tan *et al.*, 2007) 또는 육상으로부터 유입에 의해서 증가되었거나, 해수 유동의 변화로 해수 내에서 교란이 증가되면서 아표층(sub-surface)에서 영양염 공급으로 클로로필 농도가 증가될 수 있을 것이다. 그래서 2010년 같은 시기의 MODIS 위성을 이용하여 클로로필 농도를 비교해 보았다(GOCI 해색위성은 2010년 6월 발사). Fig. 6에서 2010년 3월에서 5월까지의 MODIS 클로로필은 외해에서 이미 증가되어 나타났다. 이것은 봄철 식물성플랑크톤 대번식(spring phytoplankton bloom)과 연관되어 2010년과 2011년의 차이를 구분하기는 힘들었다. 2011년 외해에서 증가된 클로로필은 매년 발생하는 봄철 식물성플랑크톤 대번식 때문인지 또는 지진해일에 의해서 해양생태계에 영향을 주었는지는 단정하기는 힘들고 이에 대한 많은 연구가 필요 할 것으로 사료된다.

두 번째, 위성에서 추정된 클로로필과 부유물질 농도

와 연관된 Rrs(555)는 지진해일에 의한 해양환경의 변화를 모니터링 하는데 사용했다 (Davis *et al.*, 2000; Ahn *et al.*, 2001). 연구지역에서 상대적으로 증가된 클로로필은 해안선을 따라 수심 30 m 이내의 지역에서 현저하게 나타났고, 외해로 가면서 약해지는 경향을 보였

다. Rrs(555) 변화도 이와 유사한 경향을 보였다(Figs. 1, 4, 5). 해저에서 퇴적물 조성은 지진해일에 영향을 받은 지역에서 지진해일 전보다 세립질에서 조립질 퇴적물로 변화되고(Noda *et al.*, 2007), 해수 표층에서 증가된 부유물질은 지진해일의 backwash에 의해서 영향을

Fig. 5. Close comparison using GOCI chlorophyll and Rrs(555). The tsunami impact was confined within the shallow water depth and disappeared after two months.

받았다(Tan *et al.*, 2007). Tan *et al.*(2007)는 2004년 인도양에서 일어난 지진해일에 영향을 받은 지역에서 증가된 부유물질 때문에 클로로필 농도가 과대 추정되는 것으로 보고하였다. 이는 해저 바닥으로부터 재부유된 부유물질은 퇴적물뿐만 아니라 용존된 물질들도 같이 상승하게 되면서 표층 해수면에서 산란 및 흡수가 증가하게 되어 클로로필 농도는 상대적으로 과대 추정되었다(Son *et al.*, 2009; Son *et al.*, 2011). 지진해일의 영향을 받은 지역에서 Rrs(555)는 급격하게 증가되고 단파장에서는 흡광이 증가되었다(본 연구에서 나타내지 않았음). 두 개의 해색위성에서 추정된 클로로필 농도는 상대적으로 과대 평가된 것으로 사료되고, 이런 영향은 증가된 유기물/무기물 입자들과 용존된 물질에 의한 매우 복잡한 해양환경 변화로 야기되었다(Son *et al.*, 2011; Tan *et al.*, 2007). 연구지역에서 해양환경의 변화는 수심이 깊은 외해보다는 천해환경에서 뚜렷이 나타났다. 연구지역에서는 수심 30 m 이내에서 현저했다. 증가된 클로로필과 부유물질은 일부 연안 해류에 의해서 외해로 확산되는 경향을 보였다(Figs. 1, 4, 5). 해색위성에서 클로로필과 Rrs(555)는 상대적으로 심각한 지진해일의 영향을 받았던 지역에서 명확하게 나타났고, 지진의 영향이 상대적으로 작았던 지역에서는 변화를 감지하기 힘들었다.

세 번째, 일본 동부지역 지진해일의 영향이 사라지고 이전의 해양환경으로 복원되는 시기를 살펴보았다. 연구지역의 2010년 3월~5월 MODIS 영상에서 증가된 클로로필 농도는 연안 및 외해에서도 나타났다(Fig. 6). 클로로필 농도는 지진해일에 영향을 받은 2011년 영상들과 유사한 경향을 보이지만(Figs. 4-5), 2011년 Rrs(555)는 지진해일에 의한 수층 교란에 의해 저층 퇴적물의 재부유에 의해 증가된 반사도를 보였다. GOCI 및 MODIS 영상에서는 지진해일에 의한 해양환경의 변화는 2011년 3월12일에 관측되었다. 지역적 차이는 있지만 증가된 클로로필 및 Rrs(555)은 센다이 주변 해역에서 나타났다. 2011년 3월 13일 클로로필 및 부유물질은 두 개의 해색위성에서 모두 전날에 비해서 넓은 지역에서 증가되었다(Fig. 4). 지진해일이 도달하는 거리가 다르고, backwash에 의한 영향으로 육지에서 밀려나온 부유물질에 의해서 초기보다 증가되어 나타났다(Guo *et al.*, 2011; Mimura *et al.*, 2011; Noda *et al.*,

2007; Tan *et al.*, 2007). 클로로필 및 부유물질은 연구 지역에서 지진해일에 의한 해양의 변화를 감지하는데 좋은 지시자가 되었다. 한달 후 클로로필 및 부유물질은 증가되었던 부분들이 많이 복원되었지만, 잔류된 부분도 관측되었다. 지진해일 발생 두 달이 지난 후 GOCI 및 MODIS에서 관측된 클로로필 및 Rrs(555)의 절대값이 현저하게 감소되고, 외해에서는 상대적으로 증가되었다(Figs. 4-5).

지진해일 모니터링은 2011년 5월 이후에도 계속적으로 실시하였다. 지진해일에 의해서 영향을 받았던 지역은 부분적으로 증가된 클로로필과 부유물질 농도가 나타났다. 그러나 이런 원인에 대해서는 정확하게 일차적으로 일어났던 지진해일에 의한 것인지 아니면 이차적으로 다른 원인 제공에 의한 변화인지는 제공되는 자료의 제한으로 명확하게 판명하기는 힘들고 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 6. To determine the difference of the oceanic environment, especially offshore between spring 2010 and 2011, MODIS chlorophyll and Rrs(555) were shown and compared to Figs. 4 and 5.

5. 결 론

2011년 3월 11일 일본 동부 지방에 진도 9.0의 대규모 지진이 발생했다. 이것은 1900년 이후 세계에서 세 번째로 큰 지진으로 기록이 되었다. 일본 동부 연안은 지진에 의한 피해보다는 지진해일이 남북방향으로 길게 발달된 일본 연안을 따라서 진행하면서 많은 피해를 주었고, 해양에서도 또한 많은 영향을 받았다.

GOCI의 true color 영상은 지진해일 발생 전과 후에 연안을 따라 해양환경이 교란되고, 화재로 인한 연기들이 동쪽으로 이동이 관측되었다. 그리고 지진해일의 영향으로 일본 센다이 주변 육상이 5 km 정도 침수되었고, 지진 발생 한달 후에도 육상의 침수 지역이 부분적으로 남아 있는 것이 확인되었다.

자세한 해양의 변화를 모니터링 하기 위해, 두 개의 해상위성에서 계산된 클로로필과 부유물질을 지시하는 Rrs(555)을 이용하여 3월에서 5월까지 영상을 이용하여 변화를 모니터링 하였다. 지진 발생일인 2011년 3월 11일은 관측시간의 제한으로 변화를 관측하지 못했고, 다음날인 3월 12일 두 개의 모든 위성에서 연안을 따라 클로로필 및 부유물질이 증가된 것을 확인했다. 증가된 지역은 연안에서 5-13 km 정도 되었다. 3월 13일은 전날보다 교란된 영역이 더 확장되어 나타났다. 그러나 해양환경은 두 달이 지난 5월에 이전의 해양환경으로 복원된 것으로 관측되었다.

클로로필 변화는 연안 수심 30 m 이내 지역에서 증가되었고, 이 지역에 급격히 영향을 받은 것으로 관측되었다. 이것은 지진해일이 연안에 진입하면서 바닥에 퇴적된 유기물/무기물 뿐만 아니라 용존물질까지 재부유시키고, 해양 표층에서는 긴 파장에서는 반사도가 증가되고 짧은 파장에서 흡광이 증가되었다. Rrs(555) 변화는 클로로필에서 보여주는 것과 동일한 시간적/공간적 변화를 보여주었다. 그러나 외해에서 지진해일에 의한 영향이 미쳤는지 또는 연안에서 받은 영향이 외해로 전파되었는지 단순한 영상 분석에서 구분하기는 힘들고 더 많은 연구가 필요 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업인 “정지궤

도 해양위성(GOCI) 활용연구지원”의 연구비 지원에 의해 수행되었고, 한국해양연구원 일반사업인 PE98781와 PE98731 지원에 의해서 수행되었습니다. 본 연구를 위해서 자료 처리를 도와주신 이순주, 안재현, 민승환 연구원께 감사 드립니다.

참고문헌

- 조성익, 안유환, 유주형, 강금실, 윤형식, 2010. 정지궤도 해상탐재체(GOCI)의 개발, *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(2): 157-165.
- 한희정, 유주형, 안유환, 2010. 정지궤도 해상탐재체(GOCI) 해양자료처리시스템(GDPS)의 개발, *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(2): 239-2249.
- Ahn, Y.H., J.E. Moon, and S. Gallegos, 2011. Development of suspended particulate matter algorithms for ocean color remote sensing, *Korean Journal of Remote Sensing*, 17:285-295.
- CBS News, 2011. Earth's Day Length Shortened by Japan Earthquake. March 13. <http://www.cbsnews.com/stories/2011/03/13/scitech/main20042509.shtml>.
- Chadha, R.K., G. Latha, H. Yeh, C. Peterson, and T. Katada, 2005. The tsunami of the great Sumatra earthquake of M 9.0 on 26 December 2004-Impact on the east coast of India, *Current Science*, 88(8): 1297-1301.
- Chai, C., 2011. Japan's Quake Shifts Earth's Axis by 25 Centimeters. Montreal Gazette (Postmedia News), March 11. <http://www.webcitation.org/5x5t0CLU>.
- Chang, K., 2011. Quake Moves Japan Closer to U.S. and Alters Earth's Spin. The New York Times, March 13. <http://www.nytimes.com/2011/03/14/world/asia/14seismic.html>.
- Davis, C.O., J.T.P. Kirk, J.S. Parlow, and S. Sathyendranath, 2000. Measurement requirements for Case 2 waters, In Remote

- Sensing of Ocean Color in Coastal, and Other Optical-complex, Waters, S. Sathyendranath (Ed.) *Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group*, no.3, pp 77-91, Dartmouth, IOCCG.
- Guo, H.D., Y. Chen, Q. Feng, Q.Z. Lin, and F. Wang, 2011. Assessment of damage to buildings and farms during the 2011 M 9.0 earthquake and tsunami in Japan from remote sensing data, *Chinese Science Bulletin*, 56(20): 2138-2144.
- Ide, S., A. Baltay, and G.C. Beroza, 2011. Shallow dynamic overshoot and energy deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 332: 1426-1429.
- Japan Meteorological Agency (JMA),www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake.html 2011.
- Japan National Police Agency, 2011. Damage and Police response to the Northeast Pacific Earthquake. April 13. <http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/index.htm>.
- McClain, C.R., G.C. Feldman, and S.B. Hooker, 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series, *Deep-Sea Research II*, 51: 5-42.
- Mimura, N., K. Yasuhara, S. Kawagoe, H. Yokoki, and S. Kazama, 2011. Damage from the Great East Japan Earthquake and Tsunami ? A quick report, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16: 803-818.
- NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration), 2011. Japan Tsunami Wave Heights. http://sos.noaa.gov/datasets/Ocean/japan_quake_tsunami.html.
- Noda, A., H. Katayama, T. Sagayama, K. Suga, Y. Uchida, K. Satake, K. Abe, and Y. Okamura, 2007. Evaluation of tsunami impacts on shallow marine sediments: An example from the tsunami caused by the 2003 Tokachi-Oki earthquake, northern Japan, *Sedimentary Geology*, 200: 314-327.
- Norio, O., T. Ye, Y. Kajitani, P. Shi, and H. Tatano, 2011. The 2011 Eastern Japan Great Earthquake Disaster: overview and comments, *International Journal of Disaster Risk Science*, 2(1): 34-42.
- O'Reilly J.E *et al.*, 2000. Ocean Color chlorophyll *a* algorithms for SeaWiFS, OC2 and OC4: Version 4. in *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analysis, Part 3, SeaWiFS Postlaunch Tech. Rep. Ser.*, vol. 11, NASA/TM-2000-206892, edited by S. B. Hooker and E. R. Firestone, pp. 9-27, NASA, Greenbelt, MD.
- Sato, M., T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada, 2011. Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Science*, 332: 1395.
- Son, Y.B., J. Ishizakak, J.C. Jeong, H.C. Kim, and T.E. Lee, 2011. Cochlodinium polykrikoides red tide detecting in the South Sea of Korea using spectral classification of MODIS data, *Ocean Science Journal*, 46(4):239-263.
- Son, Y.B., W.D. Gardner, A.V. Mishonov, and M.J. Richardson, 2009. Multispectral remote-sensing algorithms for particulate organic carbon (POC): The Gulf of Mexico, *Remote Sensing of Environment*, 113: 50-61.
- Tan, C.K., J. Ishizaka, A. Manda, E. Siswanto, and S.C. Tripathy, 2007. Assessing post-tsunami effects on ocean color at eastern Indian Ocean using MODIS Aqua satellite, *International Journal of Remote Sensing*, 28: 3055-3069.
- The Aviation Herald, 2011. Tsunami Rolls through Pacific, Sendai Airport under Water, Tokyo Narita Closed, Pacific Region Airports Endangered. March 11. <http://avherald.com/h?article=43928907&opt=0>.