

공간분석 기법을 이용한 만리포 유분의 시·공간 변동 패턴 분석

김태훈¹ · 최현우^{1*} · 김문구² · 심원준²

A Spatio-Temporal Variation Pattern of Oiling Status Using Spatial Analysis in Mallipo Beach of Korea

Tae-Hoon KIM¹ · Hyun-Woo CHOI^{1*} · Moon-Koo KIM² · Won-Joon SHIM²

요 약

만리포는 2007년 12월 허베이 스피리트호 유류유출 사고로 유류오염 피해를 입은 대표적인 해변이다. 본 연구는 만리포 전체 영역과 5개로 분할된 영역을 대상으로 유분(TPH: Total Petroleum Hydrocarbon)의 시·공간적 변화 패턴에 대해 두 계절(동계와 하계)의 차이를 비교하고자 한다. 만리포 전체 영역에서 4년간 시간에 따른 유분농도의 감소율은 동계가 하계보다 약 두 배 크게 나타났다. 유분농도의 가중공간중심(weighted mean center)과 가중표준거리(weighted standard distance)를 이용한 유분분포의 공간적 변화 패턴 분석 결과, 동계에는 유분이 만리포의 남서 해변으로 군집된 패턴을 보인 반면, 하계에는 전 영역으로 분산된 패턴을 보였다. 만리포 내 분할 영역에서 유분의 시간적 변동은 동계에 모든 영역에서 농도가 지속적으로 감소한 반면, 하계에는 2009년 이후 남서 해변을 제외한 모든 영역에서 농도 변화를 보이지 않았다. 따라서 유류오염의 진행 상황을 평가하고 예측하기 위해서는 동계와 하계와 같이 시기를 구분하여 공간분석 기법을 이용한 유분의 시·공간 변동 패턴 분석이 필요하다. 또한, 지역적으로 불균등한 유분분포의 시간적 변동 패턴을 해석하기 위해서는 전체 해변에서 보다는 공간분할을 통한 지역 규모에서의 시계열적 분석이 유용하다.

주요어 : 유류유출, 유분, 시·공간적 변동, 가중공간중심, 가중표준거리, 만리포

2012년 10월 18일 접수 Received on October 18, 2012 / 2012년 11월 20일 수정 Revised on November 20, 2012 / 2012년 12월 14일 심사완료 Accepted on December 14, 2012

1 한국해양과학기술원 해양과학데이터센터 Oceanographic Data & Information Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

2 한국해양과학기술원 남해연구소 유류·유해물질연구단 Oil & POPs Research Group, Korea Institute of Ocean Science & Technology

* Corresponding Author E-mail : hwchoi@kiost.ac

ABSTRACT

Mallipo is a representative beach contaminated by Hebei Spirit oil spill accident in December 2007. This study aims to compare the differences of two seasons (winter and summer) for the spatio-temporal variation patterns of oiling status in the whole area and divided five regions of Mallipo beach. In the whole area, the decreasing rate of average TPH (total petroleum hydrocarbon) in winter was twice greater than summer during four years. According to the spatial variation pattern analysis of oiling status using weighted mean center and weighted standard distance, the oil concentration was clustered on southwestern region in winter, however, the TPH was dispersed in the whole area in summer. Temporal variation pattern of TPH in each of Mallipo's five regions showed that TPH had been consistently decreased in winter, but oil concentration had not been changed in summer since 2009 except the southwestern region. Therefore, in order to evaluate and predict the progress of oiling status, it is needed to analyze the spatio-temporal variation pattern of TPH using spatial analysis after separating data into seasons (e.g., winter and summer). In addition, time series analysis is useful in the regional scales through spatial partitioning rather than the whole beach area for the understanding of temporal variation pattern.

KEYWORDS : *Oil Spill, Total Petroleum Hydrocarbon, Spatio-Temporal Variation, Weighted Mean Center, Weighted Standard Distance, Mallipo Beach*

서 론

2007년 12월 7일 1만 1,800톤급 바지선과 허베이 스피리트호의 충돌로 인해 유류유출 사고가 발생하였다. 유출된 원유는 강한 북서풍으로 인해 빠르게 조간대 지역으로 침투하였으며, 태안 인근의 구름포, 만리포, 천리포 등 대부분의 해수욕장을 오염시켰다(국토해양부, 2009). 사고발생 이후 오염된 해수욕장의 오염상태를 측정하기 위하여 한국해양과학기술원에서는 공극수(퇴적물 입자 사이에 함유된 해수)에 포함된 유분(TPH: Total Petroleum Hydrocarbon)을 측정하는 조사가 지속적으로 이루어지고 있다(국토해양부, 2012). 사고 초기 만리포는 유분농도가 2,700ppb로서 해수 내 오염수질기준치인 10ppb에 비해 매우 높은 수치가 관측되었다

(Kim *et al.*, 2010). 2011년까지의 유류오염 모니터링에 따르면 만리포 해수욕장의 유분농도가 지속적으로 감소하는 경향을 보였지만, 일부 지역에서는 여전히 높은 오염수치가 관측되는 것으로 나타났다. 특히 2011년 1월의 유분농도는 평균 3.5ppb, 최고 22.3ppb를 보인 반면, 6월의 유분농도는 평균 21.3ppb, 최고 288.4ppb로써 하계가 동계보다 높은 현상을 보였다.

유류오염과 관련하여 오염성분의 시·공간적 변화패턴을 연구한 사례는 다음과 같다. Gonzalez *et al.*(2006)은 2002년 11월 스페인 연안에서 발생한 Prestige 유류유출 사고 후 해수 내 DDPH(Dissolved and Dispersed Petroleum Hydrocarbons)와 PAHs(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)를 측정하여 스페인의 다른 두 해변에 대해 시간에 따른 유분농도의 시간에 따른 변화패턴을 비교하다.

Soriano *et al.*(2006)은 해변에 서식하는 홍합에 내포된 PAHs 성분에 대한 시기별 비교를 수행한 바 있으며, PAHs 성분 중 각 정점의 해수 내 플로란센(fluoranthene)과 피렌(pyrene)의 비율을 원유를 기준으로 계절별로 비교하였다. 또한, Wattayakorn *et al.*(1998)은 타일랜드만 해역에 대하여 1993년부터 1995년까지 DDPH를 비롯한 염분, 바람, 조류의 계절에 따른 공간변화 패턴을 비교하였다. 이와 같이 유류유출 사고 이후 오염지역에서 시간에 따른 유분농도의 감소 패턴에 대한 분석은 이루어졌으나, 공간분석 방법을 이용한 시·공간 변화패턴 연구가 시도된 사례는 없었다.

GIS 공간분석 기법을 이용한 공간적인 변화패턴 연구는 도시계획 분야에서 인구의 공간이동 예측 시 주로 이루어졌다(주성아와 김영훈, 2006; 김홍태 등, 2009). 해양 분야에서는 한국 남부해역 표층 수온의 시·공간적 변동패턴을 분석하기 위해 수온의 가중공간중심과 표준편차타원체를 이용한 사례가 있다(윤동영과 최현우, 2011).

만리포와 같은 연안 지역은 유류오염이 발생할 경우 수심이 얕아 주변 지형과 바람, 조석 등에 따라 시·공간적인 변화폭이 크게 된다(Knauss, 1997). 따라서 만리포의 시·공간적 유류오염 변동 패턴을 이해하기 위해서는 대상지역의 지형적인 특성과 환경에 대한 파악이 필요하다. 유류유출 사고의 영향을 받은 우리나라 서해안 해변의 경우 파랑과 조석으로 인한 연안의 침식물질로 이루어져 있으며, 특히 만리포는 서해안의 전형적인 반월형 해변으로써 여름철 강우로 인한 해변 사질퇴적물 유실이 지속적으로 진행되고 있다(성호현과 방경화, 2005). 또한, 동계에는 강한 북서풍으로 해변의 모래가 배후 산지까지 이동하기도 하는 등 계절에 따른 침식과 퇴적 현상이 다르게 나타난다(김진철 등, 2010).

따라서 만리포 해수욕장과 같이 계절별 침식과 퇴적 특성이 서로 다른 지역은 계절에 따른 연도별 공극수내 유분의 변화 비교가 필

요하다. 본 연구에서는 만리포 해수욕장에 잔존하는 유분의 시간적 변동패턴과 공간적 변동패턴을 전체 영역과 분할된 영역으로 구분하여 동계와 하계의 시·공간적 변동패턴이 어떠한 차이를 보이는지 공간분석 기법을 이용하여 비교하고자 한다.

연구지역 및 자료

본 연구의 대상지역은 그림 1의 a)와 같이 위도 36° 47' N, 경도 126° 8' E에 위치하고 있는 충청남도 태안군 소원면 모항리 만리포 해수욕장이다. 공간 분석을 위한 범위는 그림 1의 b)와 같이 만리포 해변 전체 지역으로 정의하였다. 또한, 반월형 해변인 만리포는 북쪽은 암반지역이 존재하고 등대방향(남서쪽)은 방파제로 인한 해수의 순환이 상대적으로 원활하지 않는 지형적 특성이 존재한다. 따라서 전체 영역과 함께 지역적인 시·공간적 변동 특성을 함께 비교하고자 연구지역을 5개 영역(A~E)으로 공간 분할하였다.

본 연구는 2008년부터 2011년까지 4년간 동계(1월)와 하계(6월)에 만리포 해수욕장의 32~56개 지점에서 채취한 퇴적물의 공극수 시료를 이용하였다. 공극수 내 잔존 유분은 현장에서 즉시 해수 중에 존재하는 잔류유분의 농도를 형광분석기를 이용하는 형광분석법(Lambert *et al.*, 2003)을 통해 TPH 농도를 측정하였다(국토해양부, 2009; 국토해양부, 2010; 국토해양부, 2011; 국토해양부, 2012). TPH는 해양에서 자연적으로 혹은 유류사고로 유입되는 주요 오염물질로써 주로 등유, 경유, 제트유, 병커C유로 인한 오염 여부를 판단하는 기준이 된다(Gesamp, 2007).

연구 방법

만리포 전체 영역에 대한 유분의 동계와 하계 시·공간적 변화패턴을 탐색적으로 비교하기 위해 관측된 유분농도 값을 로그 스케일로 변환하여 두 계절의 유분분포지도를 제작하였

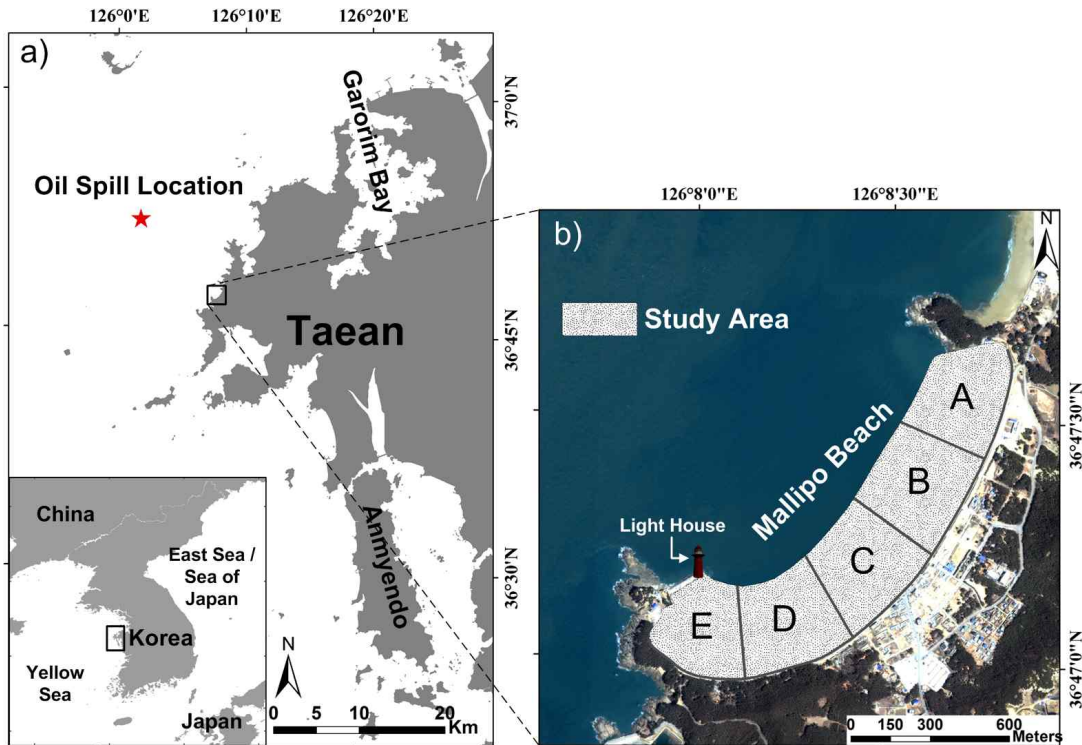


FIGURE 1. 연구지역인 만리포 해수욕장의 위치 a)와 세부 공간분할 영역 b)

다. 또한, 동계와 하계 유분농도의 평균과 표준편차 등 기초통계자료를 산출하고, 두 계절의 평균 유분농도의 차이를 통계적으로 비교하기 위하여 K-S(Kolmogorov-Smirnov) 검정을 수행하였다. 두 계절의 평균 유분농도(log scale)의 시간에 따른 변화패턴 비교와 더불어 각 측정 지점의 유분농도를 가중치로 하는 가중공간중심(weighted mean center: WMC)과 가중표준거리(weighted standard distance: WSD)를 계산하여 공간적 변화패턴을 비교하였다. 아울러 만리포 오염의 지역적인 감소추이를 비교하기 위해 5개로 분할된 세부 영역별 평균 유분농도의 연도별 변화패턴도 분석하였다.

1. 전체영역 유분의 변화 패턴 비교

만리포의 동계와 하계에 유분의 공간상 변

화를 시각적으로 탐색하기 위하여 4년간의 자료를 이용하여 유분분포지도를 각각 제작하였다. 김태훈과 최현우(2011)가 제시한 해양과학조사 자료에 대한 표준화된 주제도 제작방법 중 본 연구에서는 유분농도 값을 역거리가중 보간법(inverse distance weighted)을 이용하여 등치선(contour) 타입의 지도로 제작하였다.

두 계절의 평균 유분농도 차이 유무를 통계적으로 판단하기 위해 K-S 검정을 수행하였다. K-S 검정은 자료 수와 독립된 두 표본의 수가 다를 경우 관측된 값이 동일한 모집단에서 추출된 것인지 검증하고자 사용되는 통계적 방법(국토연구원, 2004)으로써 만리포 자료의 경우, 매 조사시기마다 정점 수가 일정하지 않아 이를 적용하였다.

유분분포의 시간적 변화패턴 비교를 위해서

는 두 계절에 대한 4년간 평균 유분농도의 감소율을 계산하였다. 공간적 변화패턴은 가중 공간중심(WMC)과 가중표준편차거리(WSD)를 산출하여 동계와 하계를 비교하였다. 여기서 가중치는 유분농도 값을 이용하였고, 유분자료의 GIS 자료변환과 WMC 및 WSD 분석은 ArcGIS 9.2(ESRITM) 툴을 이용하였다. 공간중심(mean center: MC)이란 기하학적 객체의 공간상의 중심을 의미하며, WMC는 객체의 기하학적 위치 뿐 아니라 객체가 가지는 속성 값을 가중치로 이용한 공간상의 중심을 의미한다(Smith and Goodchild, 2007). 본 연구에서는 그림 1의 b)와 같이 연구지역인 만리포 해변의 기하학적 중심을 MC로 정의하였으며, MC의 계산식은 식 1과 같다. 여기서 \bar{X}_{mc} , \bar{Y}_{mc} 는 MC의 x, y 좌표이고 n은 전체 자료 수, x_i , y_i 는 전체 자료 중 i 번째 x, y 좌표를 의미한다. 폴리곤 객체의 경우 폴리곤의 꼭지점 좌표를 이용하여 MC를 구할 수 있다.

$$MC = \left(\sum_i \frac{x_i}{n}, \sum_i \frac{y_i}{n} \right) = (\bar{X}_{mc}, \bar{Y}_{mc}) \quad (1)$$

WMC의 계산식은 식 2와 같으며, 여기서 x, y 좌표와 가중치의 곱을 전체 가중치의 합으로 나눈 값의 평균이다. \bar{X}_{wmc} , \bar{Y}_{wmc} 는 WMC의 x, y 좌표이며, w는 가중치로서 좌표에 해당하는 속성 값이다.

$$WMC = \left(\frac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i}, \frac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i} \right) = (\bar{X}_{wmc}, \bar{Y}_{wmc}) \quad (2)$$

표준편차거리(SD)는 각 점들이 MC로부터 얼마나 분산되어 있는지를 거리로 나타내는 통계적 방법이다. 표준편차거리가 클수록 점들이 분산되어 있으며, 표준편차거리를 반지

름으로 하는 원을 그림으로써 MC로부터 각 점들의 분산정도를 비교할 수 있다(O'Sullivan and Unwin, 2003).

본 연구에서는 유분농도를 가중치로 이용하여 WMC의 이동패턴을 분석하였으며, WMC를 중심으로 유분이 분산된 정도를 나타내기 위하여 WSD도 함께 구하였다. WSD는 가중치를 고려하여 SD를 계산하는 방법으로 유분이 고루 분포할수록 WSD는 큰 값을 가지며, 높은 농도의 유분이 군집되어 분포할수록 WSD는 작은 값을 가진다. WSD의 계산 방법은 식 3과 같다(Wong and Lee, 2005).

$$WSD = \sqrt{\frac{\sum_i w_i (x_i - \bar{X}_{wmc})^2 + \sum_i w_i (y_i - \bar{Y}_{wmc})^2}{\sum_i w_i}} \quad (3)$$

2. 분할영역별 유분의 시·공간 변화 패턴 비교

만리포 해수욕장은 육지 방향의 호안을 기준으로 총 길이가 약 2.1km이며, 부채꼴 형태의 해변을 이루고 있다. 해수욕장의 경계는 육지 방향 호안을 기준으로 하였으며, 경계를 따라 해안선 라인 객체를 생성하였다. 4년간 수행된 모니터링 조사는 만리포 해수욕장의 가로방향으로 10~15개, 세로방향으로 3~4개 라인을 기준으로 수행되었으며, 본 연구에서는 영역 별로 약 10개 이상의 정점을 포함하도록 5개의 분할 영역을 설정하였다. 분할 방법은 먼저 해안선 라인객체를 5개의 등 간격 선으로 분할하였으며, 분할된 5개의 각 선으로부터 해안 방향으로 수직인 법선 벡터를 생성하여 만리포 전체영역을 A~E까지 5개의 폴리곤으로 분할하였다. 이렇게 제작된 각 영역을 대상으로 연도별 동계와 하계의 평균 유분농도를 계산하여 영역별로 두 계절의 시·공간 변화패턴을 비교하였다.

결과 및 토의

1. 공간변화 탐색 및 통계량

2008년 1월부터 2011년 6월까지 만리포 해수욕장에서 조사된 유분 자료를 이용하여 그림 2와 같은 유분분포지도를 제작하였다. 붉은색 영역은 유분농도가 1,000ppb 이상인 오염이 심한 지역이며, 하늘색 영역은 유분농도가 해수 내 오염기준치인 10ppb 이하인 지역이다.

사고 초기인 2008년에는 그림 2의 a)와 그림 2의 e)와 같이 동계와 하계 모두 만리포 전역에 걸쳐 높은 유분농도를 보였으나, 시간이 지남에 따라 두 계절 모두 유분의 농도가 줄어드는 분포를 보였다. 2009년까지는 동계가 하계에 비해 오염지역이 더 넓은 분포를 보였으나 2010년은 그림 2의 g)와 같이 하계가 동계(그림 2의 c)와 비교하여 더 넓은 오염 지역이 관찰되었다. 2011년 동계는 그림 2의 d)와 같이 두 지점을 제외한 모든 지역이 유분농도가 10ppb 이하로 크게 정화된 모습

을 보였지만 하계에는 그림 2의 h)와 같이 북동 해변에서 유분농도가 10ppb 이상인 오염 지역이 관찰되어 2010년과 같이 동계보다 더 넓은 오염지역이 나타났다.

만리포 유분농도 자료를 이용하여 계산한 4년간의 계절별 평균 유분농도는 동계에 640.9 ppb, 하계에 111.0ppb 이며, 표준편차는 동계에 5,852.7ppb, 하계에 754.8ppb로 두 계절의 평균과 편차는 큰 차이를 보였다. 이에 본 연구에서는 통계적 분석에 필요한 정규성 조건을 만족시키기 위하여 THP 자료에 대해 로그 변환을 하였다.

로그 변환된 전체 유분농도 자료를 이용하여 연도별 동계와 하계의 평균과 표준편차 그리고 K-S 검정 결과를 표 1과 같이 정리하였다. 4년간의 평균 유분농도는 동계에 1.13 ppb(log scale) 이며, 하계에 1.03ppb(log scale) 이다. 표준편차는 동계에 0.88ppb(log scale), 하계에 0.68ppb(log scale)이다.

두 계절의 전체 유분농도 자료에 대한 K-S 검정결과 검정통계량은 0.08, 유의확률

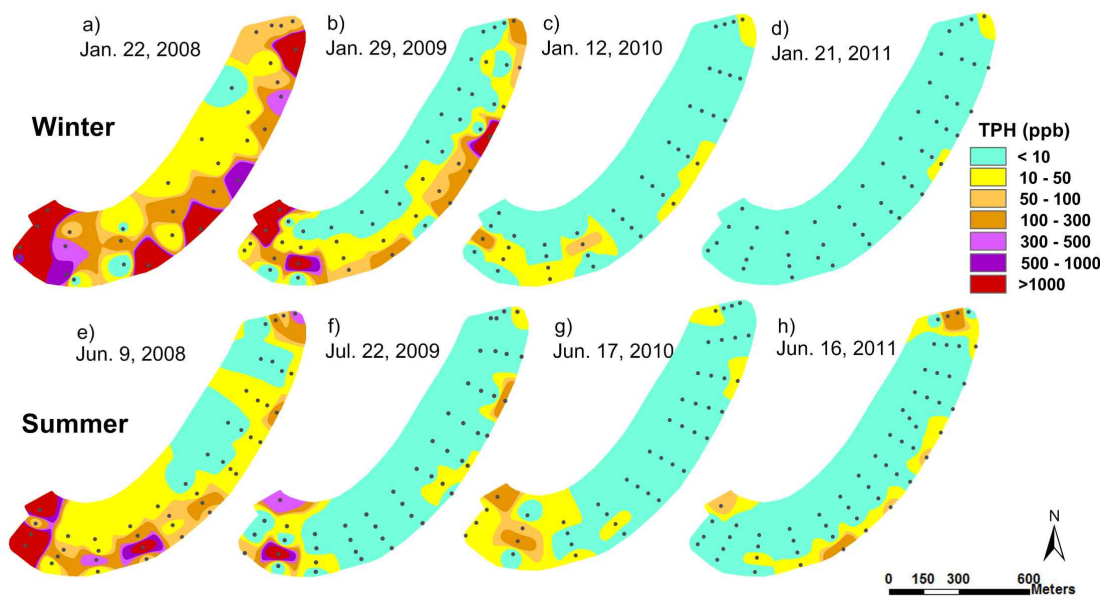


FIGURE 2. 4년간(2008 ~2011) 동계와 하계 만리포 해수욕장의 연도별 유분(TPH) 분포지도

TABLE 1. 동계, 하계 유분의 통계자료

Year	Season	N	TPH (ppb) : log transformed		K-S test	
			Mean	S.D.	D	p-value
Whole years	Winter	171	1.13	0.88	0.08	0.51
	Summer	196	1.03	0.68		
2008	Winter	32	2.16	1.00	0.32	0.03
	Summer	48	1.60	0.78		
2009	Winter	48	1.33	0.84	0.33	0.01
	Summer	48	0.94	0.54		
2010	Winter	43	0.81	0.40	0.18	0.43
	Summer	44	0.80	0.50		
2011	Winter	48	0.54	0.28	0.30	0.02
	Summer	56	0.82	0.54		

(p-value)은 0.51로 유의수준 0.05에서 두 계절 평균 유분농도의 차이가 없게 나타났다. 하지만 연도별로 두 계절을 분석한 결과 2010년도에는 유의확률이 0.43으로 동계와 하계에 평균의 차이가 없었으나, 나머지 2008, 2009, 2011년의 경우 모두 유의수준 0.05보다 낮은 유의확률을 보여 두 계절의 평균 유분농도의 차이가 있는 것으로 나타났다.

2. 전체영역 유분분포의 시간적 변화 패턴

2007년 12월 유류유출 사고 이후 동계와 하계 만리포 해수욕장의 연도별 평균 유분농도 변화는 그림 3과 같다. 2008년과 2009년은 동계의 평균 유분농도가 하계보다 더 높았으나, 2010년은 표 1과 같이 두 계절의 평균 유분농도 차이가 0.01 ppb(log scale)로 같은 패턴을 보였다. 하지만 2011년은 동계만

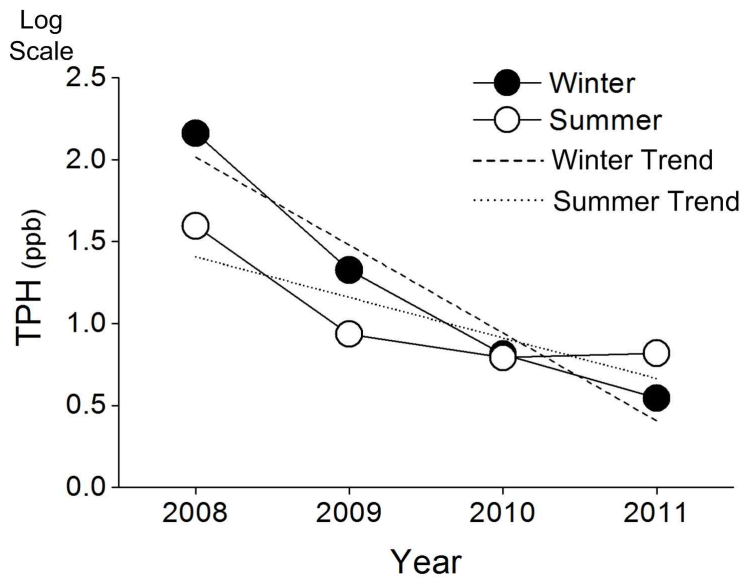


FIGURE 3. 동계와 하계 만리포 해수욕장의 연도별 로그 변환된 평균 유분농도(TPH) 변화

감소하고 하계는 유분농도가 2010년과 근사한 값이 나타나 동계보다 0.28 ppb(log scale) 더 높은 평균 유분농도를 보였다. 4년간 평균 유분농도는 시간에 따라 두 계절 모두 지속적으로 감소하는 패턴을 보였지만 동계에는 약 54%, 하계에는 약 25%의 감소율로써 동계가 하계보다 약 두 배의 빠른 감소율을 보였다.

3. 전체영역 유분분포의 공간적 변화 패턴

1) 유분농도의 가중공간중심 이동 패턴

동계와 하계의 연도별 WMC 공간 이동궤적과 평균 유분농도를 함께 표현하기 위해 각 WMC의 위치에서 평균 유분농도를 버블차트로 나타냈다(그림 4). 그림 4에서 버블차트 좌표의 원점(0m, 0m)은 만리포 해수욕장 전체 지역의 공간상 중심에 해당하는 MC를 의

미하며, 각 시기의 WMC 좌표는 MC를 기준으로 한 상대적인 위치를 의미한다.

동계에 WMC는 사고 초기인 2008년에 MC에서 비교적 가까운 곳(-49m, -10m)에 위치하였다. 이는 만리포 전 지역의 유분농도가 모두 높았기 때문이다. 이후 2009년과 2010년에는 평균 유분농도가 지속적으로 감소하면서 WMC가 만리포 중앙 지점에서 만리포 등대가 위치한 남서 해변으로 이동하는 패턴을 보였다.

한편 유류유출 사고 이후 약 6개월이 지난 2008년 하계에는 원점에서 등대 방향인 삼사분면(-118m, -130m)에 위치하였다. 이는 그림 2의 e)에서와 같이 만리포 등대 방향 해변의 유분 농도가 동계와는 차이가 없었지만, 만리포 중앙 및 북동 지역의 정화가 빨리 이루어졌기 때문으로 판단된다. 이후 2009년

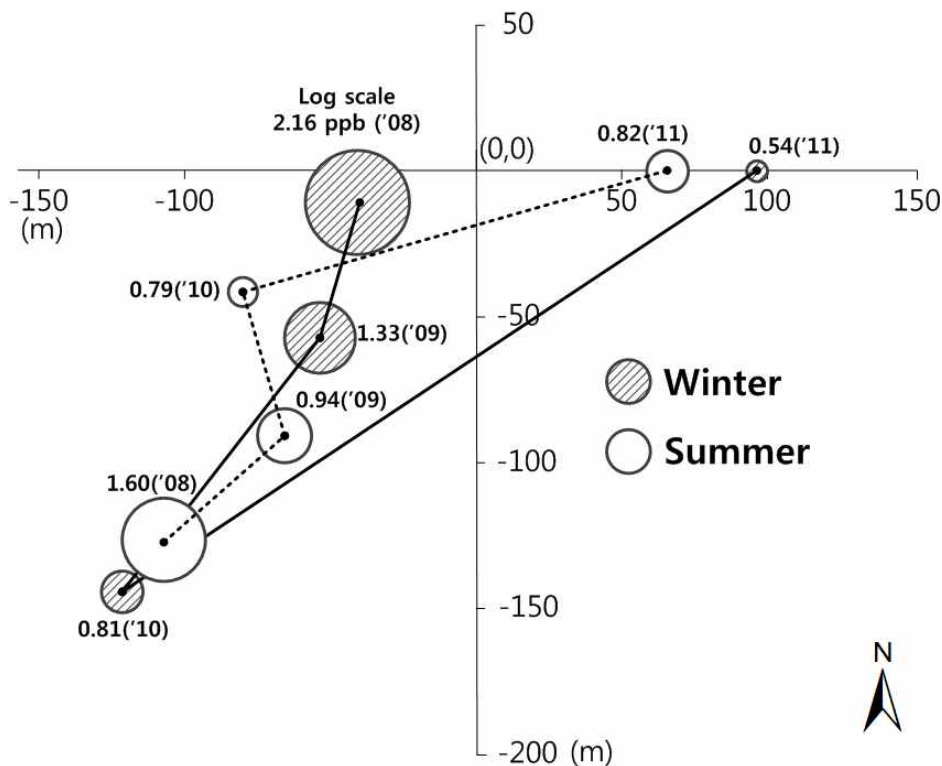


FIGURE 4. 동계와 하계 만리포 평균 유분농도(TPH)의 크기와 가중공간중심 이동 궤적

과 2010년의 하계에는 동계와 다르게 WMC가 등대 방향 해변에서 북동 해변으로 이동하는 패턴을 보였다.

2010년까지 WMC의 이동패턴이 삼사분면에 위치한 것으로 보아 다른 지역에 비해 등대 방향 해변의 유분농도가 더 높게 유지되었음을 알 수 있다. 동계에는 북동 해변보다 등대 방향 해변의 유분이 더 높은 분포패턴을 보이고, 하계에는 등대 방향 해변 뿐 아니라 북동 해변에서도 오염의 징후가 지속적으로 관찰됨에 따라 WMC 또한 북동쪽으로 이동하는 패턴을 보였다.

이는 동계에 만리포 해안 방향 해변의 침식 현상과 북동 해변의 모래퇴적 현상으로 인해 오염이 등대 방향 해변보다 낮게 관측된 것으로 보이며, 하계에는 계절풍인 남동풍과 강우로 인해 암반과 모래질로 구성된 북동쪽 육지 방향의 해변이 유실되어 표층 하에 있는 유류 성분들이 모래 표층으로 드러났기 때문으로 추정된다.

유류유출 사고 4년 후인 2011년에는 동계와 하계 모두 WMC가 원점의 동쪽에 위치하는 패턴을 보였으며, 이는 등대 방향 해변의 오염정화가 이루어졌음에도 불구하고 북동 해변의 유분농도는 다른 지역과는 상대적으로 여전히 크게 나타났기 때문이다.

2) 유분농도의 가중표준거리 변화 패턴

동계와 하계 각 조사점의 유분농도를 가중치로 하는 WSD 변화 패턴은 그림 5와 같다. WSD가 크면 만리포 전체 조사점에 대하여 유분농도가 공간적으로 고루 분포되어 있다는 것을 의미하며, WSD가 작으면 상대적으로 높은 농도의 유분이 지역적으로 군집되어 분포함을 의미한다. 동계에는 2008년에 WSD가 603m로 가장 크게 나타났고, 이후 2011년에는 523m까지 지속적으로 작아지는 패턴을 보였다. 하계에는 2008년 548m에서 2010년 591m에 이르기까지 지속적으로 커지는 패턴을 보였다.

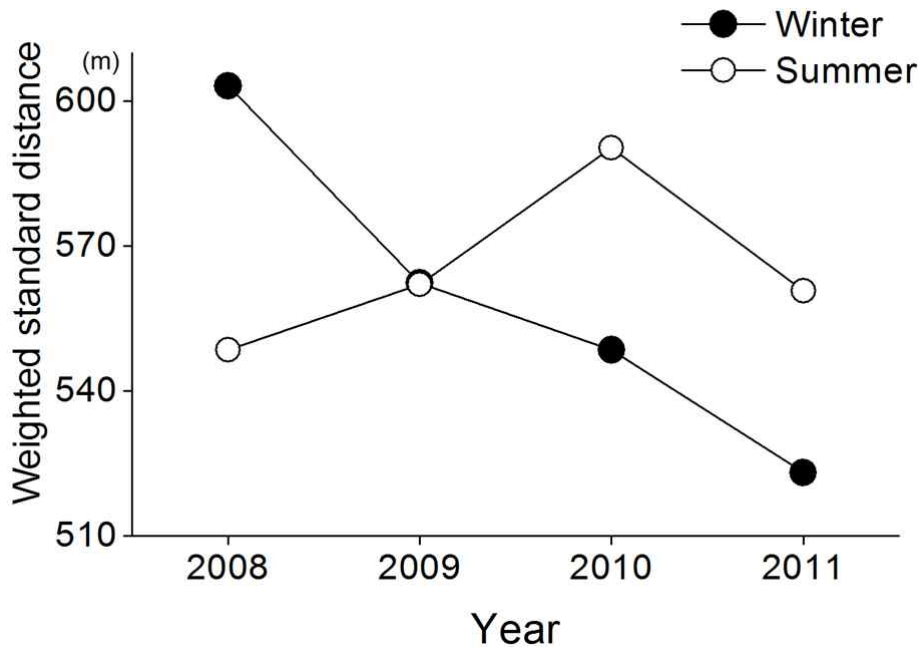


FIGURE 5. 동계와 하계 만리포 유분농도(TPH) 가중표준거리(m)의 연도별 변화

2008년부터 2010년까지 동계와 하계의 WSD의 크기 변화는 상반되게 나타났다. 이 결과에 따르면 동계에는 시간이 지날수록 일부 지역의 오염정화 속도가 느려 유분이 지역적으로 군집된 반면, 하계에는 오염이 심한 지역의 유분농도가 빠르게 감소하여 전체 조사지점에서 유분농도의 차이가 크지 않아 분산된 것으로 판단된다.

3) 유분농도의 공간적 변화 패턴 해석

두 계절의 WMC와 WSD의 변화 패턴을 비교하면 다음과 같다. 동계에는 2010년까지 WMC가 만리포 등대 방향 해변으로 이동하면서 WSD가 작아지는 패턴을 보였다. 이는 전체적으로 유분농도는 감소하였으나, 상대적으로 등대 방향 해변에서 유분농도가 군집되어 분포하는 것을 의미한다. 하지만 하계에는 2010년까지 WMC가 만리포 중앙 쪽으로 이동하면서 동계와는 반대로 WSD가 커지는 경향을 보였다. 이는 하계에는 등대 방향 해변 뿐 아니라, 북동쪽의 육지 해안에서도 높은 유분농도가 잔존하여 분산된 공간분포 패턴을 반영하는 것이다. 한편 2011년 동계와 하계에는 WMC가 동쪽으로 이동하면서 WSD가 작아지는 패턴을 보였다. 이를 토대로 두 계절 모두 등대 방향 해변의 유분농도는 크게 감소하였으나, 북동 해변에서는 여전히 상대적으로 높은 유분농도가 군집되어 잔존함을 알 수 있었다.

앞서 그림 3에서 두 계절의 평균 유분농도를 이용한 시간적 변화 패턴을 비교한 결과는 지속적으로 오염성분이 감소하는 패턴을 보였으나, 공간적 변화 패턴을 분석한 결과 만리포 해변의 오염정화 상태가 지역적으로는 불균등함을 알 수 있었다. 따라서 평균 유분농도의 감소 현상만으로 오염정화 상태를 정확히 설명하기 어려우며, 공간적 변화 패턴 결과를 함께 해석해야 한다.

이와 같이 공간분석 기법인 WMC와 WSD의 변화 패턴 분석을 통해 오염된 지역의 정화 과정과 상태를 진단할 수 있을 뿐 아니라,

WMC의 이동 궤적을 통해 오염 진행 과정도 예측 가능하다. 즉, 만리포 해수욕장의 오염이 정화되는 방향으로 진행된다는 판단 조건으로는 1) 지속적인 유분농도의 감소 패턴을 보이며, 2) WMC가 공간중심인 원점 MC에 가까워지면서, 3) WSD가 커질 때 등 3가지를 모두 만족할 때로 판단된다.

4. 분할 영역별 유분농도의 시·공간 변화 패턴

그림 6은 동계와 하계의 분할영역별 유분농도의 변화패턴 그래프이다. 그림 6의 a)는 동계의 유분농도 변화로써 사고 초기인 2008년에 영역 E는 약 3 ppb(log scale)로 영역 A~D 지역에 비해서 매우 높았다. 동계는 5개 영역에서 지속적으로 유분농도가 감소하는 패턴을 보였으며, 특히 등대 방향 해변인 영역 E는 다른 영역에 비해 빠른 감소속도를 보였다. 2011년에는 5개 영역간 평균 유분농도의 차이가 거의 없었으며, 모두 해수 내 오염수 질기준치인 1 ppb(log scale) 이하가 나타났다. 그림 6의 b)는 하계의 유분농도 변화이며, 사고 초기인 2008년은 비교적 비슷한 평균 유분농도를 보였다. 이후 영역 A~D는 영역 E에 비하여 빠른 감소속도를 가져 2009년 이후 1ppb 이하의 유분농도를 보였다. 영역 E는 동계에 비하여 느린 감소 속도를 보이다가 2011년에는 다른 영역과 비슷한 상태로 진행되었다. 하계에는 유분농도가 꾸준히 감소했던 영역 E와는 달리 영역 A와 영역 D는 2009년부터, 영역 B와 영역 C는 2010년부터 평균 유분농도가 감소하지 않고 비슷해지는 패턴을 보였다.

동계와 하계의 영역별 유분농도 변화패턴을 분석한 결과 영역 E는 사고 초기 가장 오염이 심하게 발생한 지역이었으며, 사고 발생 후 3년이 경과한 뒤에 다른 영역과 비슷한 유분농도를 보였다. 또한, 하계에는 동계에 비해서 유분농도 감소폭이 작았으며, 2011년의 경우 모든 영역에서 유분농도가 동계에 비해 높은 것으로 보아 여름철에 표층 하 퇴적물에 갇혀

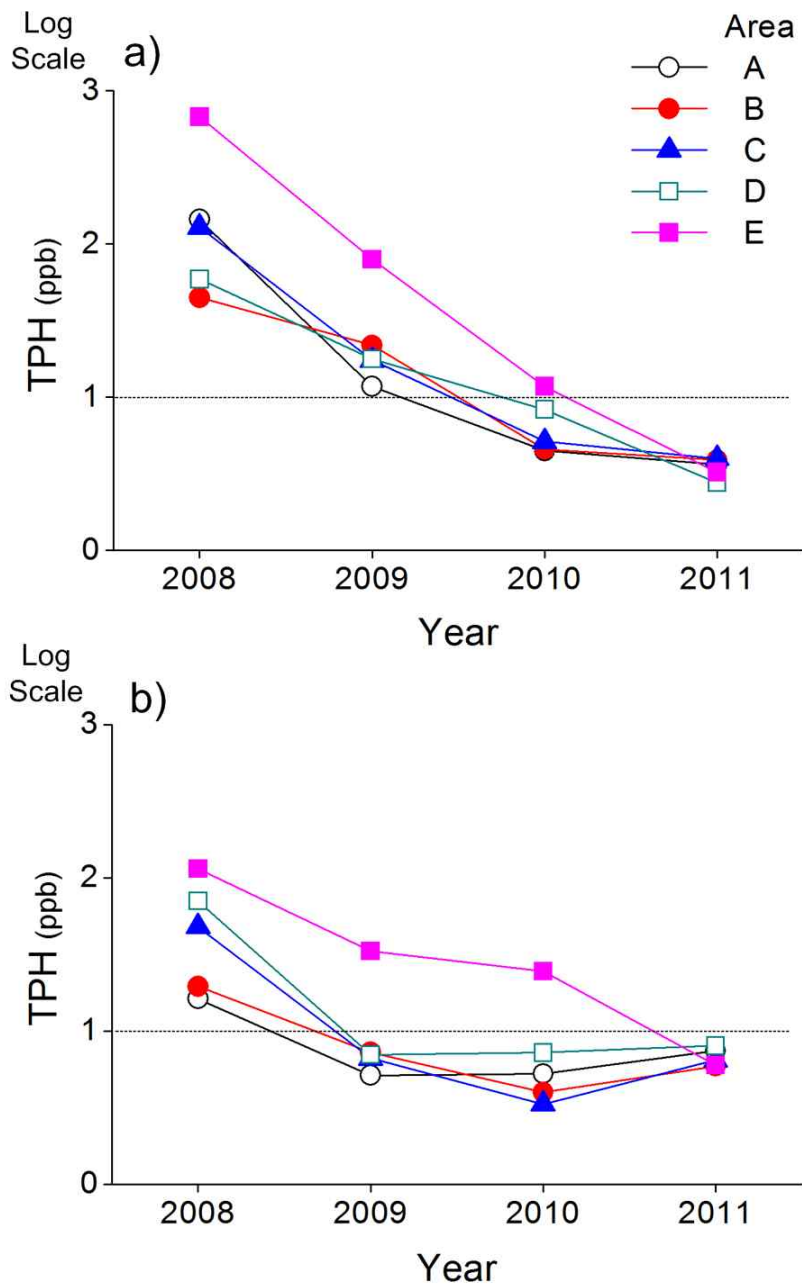


FIGURE 6. 만리포 분할 영역별 동계 a)와 하계 b) 연도별 유분농도(TPH)의 변화

있던 유분이 노출되는 것으로 추정된다.

2009년부터 2011년까지 만리포 인근 서산 기상대의 바람장미도(기상청, 2009; 기상청,

2010; 기상청, 2011)에 의하면 동계(1월)에는 북서풍이 우세하고, 하계(6~7월)에는 남풍이 우세하였다(그림 7). 이러한 계절풍의

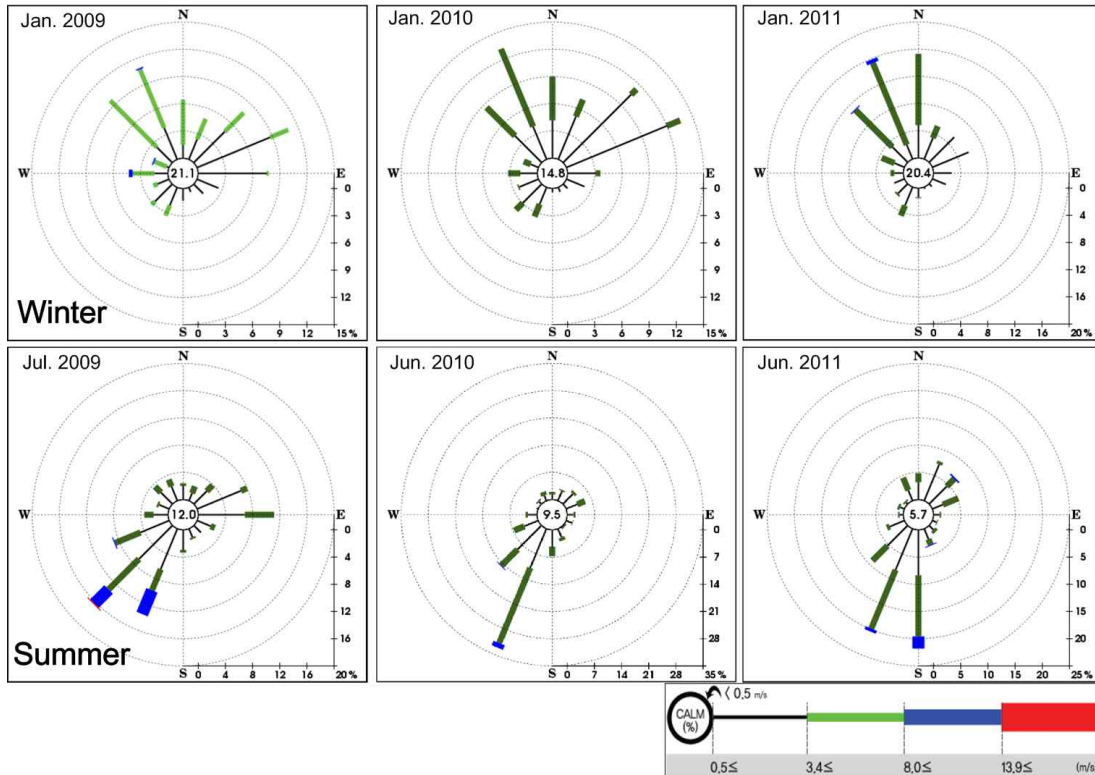


FIGURE 7. 동계와 하계의 서산 기상대 바람장미도(2009년~2011년)

방향이 만리포 해변의 모래를 동계에는 육지 방향으로 퇴적시키고 하계에는 침식시킬 수 있음을 추정 가능하다.

요약 및 결론

본 연구에서는 2007년 허베이 스피리트 유류유출사고로 피해를 입은 만리포 해수욕장을 대상으로 전체 영역과 5개의 분할 영역으로 구분하여 두 계절(동계와 하계)의 유분농도의 시간적 변화패턴과 공간적 변화패턴을 비교하였다. 전통적인 통계기법을 비롯하여 가중 공간중심과 가중 표준거리인 공간분석 기법을 이용하여 만리포 해수욕장의 유류오염 변동 패턴을 분석한 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 유분농도의 K-S검정 결과 동계와 하계 두 계절의 평균 유분농도는 통계적으로 차

이를 보였다. 또한, 2010년까지 시간적 변화 패턴은 동계의 오염정화 속도가 하계에 비하여 두 배 빠르게 진행되었으며, 2011년은 하계의 평균 유분농도가 동계보다 높게 나타났다.

둘째, 공간적 변화 패턴 분석 결과 두 계절의 오염정화는 지역적으로 불균등하게 발생하고 있었다. 2010년까지는 동계의 오염성분이 등대 방향 해변으로 군집되는 패턴을, 하계에는 분산되는 패턴을 보였다. 2011년은 두 계절 모두 북동 해변에 비해 등대 방향 해변의 오염성분이 크게 정화되는 현상을 보였다.

셋째, 5개의 분할 영역별 평균 유분농도 변화를 비교한 결과 등대 방향 해변인 영역 E는 사고 초기 가장 오염이 심한 지역이었으나, 유분농도가 지속적으로 줄어드는 현상을 보였다. 반면 나머지 영역의 경우 동계에는 평균 유분농도가 꾸준히 감소하였지만, 하계에는

2009년 이후로 뚜렷한 변화가 없었다. 이는 동계에 북서풍의 영향으로 해안방향 해변의 침식이 일어나는 반면 육지 방향 해변에서는 퇴적현상이 발생하고, 하계에는 남동풍과 집중 강우로 인해 육지 방향 해변의 표층 하에 있는 잔존 유분들이 드러나기 때문으로 판단된다.

이와 같은 연구결과에 따르면, 만리포 해수욕장에서 동계와 하계의 연도별 시-공간적 유분분포에 차이가 있을 뿐 아니라, 해수욕장 내에서도 지역적으로 시간에 따른 유분농도의 변화패턴이 다름을 알 수 있었다. 이러한 동계와 하계의 차이는 계절적인 바람의 차이 때문으로 동일한 영향을 받는 서해안에서 같은 현상이 나타날 것이라 생각된다. 따라서 서해안의 해변에서 유류오염 모니터링을 수행할 경우 동계와 하계의 조사가 필수적으로 포함되어야 하며, 동일 지역의 해변에서도 영역별로 오염상태의 진행과정이 다를 수 있음으로 공간 분할을 통한 유류오염 모니터링이 필요함을 알 수 있었다. 아울러 유류오염의 정량적인 정화 과정 및 예측을 위해 공간분석 기법의 유용성도 제시하였다. 추후 구름포와 천리포 등 유류오염의 영향을 받은 다른 서해안의 해수욕장에 대해서도 동계와 하계의 유분분포의 시·공간적 변화패턴 분석과 같은 추가적인 연구가 필요하다. **KAGIS**

참고 문헌

- 국토연구원. 2004. 공간분석기법. 한울아카데미. 61-62쪽.
- 국토해양부. 2009. 해양오염영향조사 및 생태계 복원연구 2008. 145-148쪽.
- 국토해양부. 2010. 유류오염 환경영향평가 및 환경복원연구 2009. 65:168-174.
- 국토해양부. 2011. 유류오염 환경영향평가 및 환경복원연구 2010. 65:175-176.
- 국토해양부. 2012. 유류오염 환경영향평가 및 환경복원연구 2011. 65:112-114.
- 기상청. 2009. 기상월보 1월, 7월. 94쪽.
- 기상청. 2010. 기상월보 1월, 6월. 94쪽.
- 기상청. 2011. 기상월보 1월, 6월. 95쪽.
- 김영주, 김희갑. 2009. 환경통계학. 동화기술. 49-50, 87-88쪽.
- 김진철, 음철헌, 양동윤, 김기동, 정대교, 최현구. 2010. 광여기 루미네선스(OSL) 연대측정을 위한 만리포 해안 사구층의 고환경 예비연구. 지질학회지 46(3):207-219.
- 김태훈, 최현우. 2012. 유류오염 모니터링 자료의 GIS 주제도 제작 절차 수립 연구. 한국지리정보학회지 15(1):1-15.
- 성효현, 방경화. 2005. 만리포 해변퇴적물의 동절기 퇴적환경. 한국지형학회지 12(2):87-98.
- 윤동영, 최현우. 2011. 지역 규모에 따른 한국 남부해역 표층수온의 시-공간적 변동 패턴 비교. 한국지리정보학회지 14(4):182-193.
- 주성아, 김영훈. 2007. 시설물 입지에 있어 인구 중심점 개념을 이용한 수요 규모 추정 방법 연구. 한국지리정보학회지 10(2):11-21.
- 추용식, 권수재, 박장준, 박용안. 1996. 한국 서해중부 해변에서의 퇴적자용의 계절변화. Ocean Research 18(1):37-45.
- GESAMP. 2007. Estimates of oil entering the marine environment from sea-based activities. GESAMP Report and Studies 75, U.K., 48pp.
- Gonzalez, J.J., L. Vinas, M.A. Franco, J. Fumega, J.A. Soriano, G. Grueiro, S. Muniategu, P. Lopez-Mahia, D. Prada, J.M. Bayona, R. Alzaga, and J. Albaiges. 2006. Spatial and temporal distribution of dissolved/dispersed aromatic hydrocarbons in seawater in the area

- affected by the Prestige oil spill. *Marine Pollution Bulletin* 53(2006):250–259.
- Knauss J.A. 1997. *Introduction to Physical Oceanography*. Prentice Hall, USA, 309pp.
- Kim, M., Y.H. Yim, S.H. Hong, J.H. Jung, H.W. Choi, J.G. An, J.H. Won and W.J. Shim. 2010. Hebei Spirit oil spill monitored on site by fluorometric detection of residual oil in coastal waters of Taean, Korea. *Marine Pollution Bulletin* 60(3):383–389.
- Lambert, P., M. Goldthorp, B. Fieldhouse, Z. Wang, M. Fingas, L. Pearson and E. Collazzi. 2003. Field fluorometers as dispersed oil-in-water monitors. *Journal of Hazardous Materials* 102:57–79.
- O'Sullivan, D. and D.J. Unwin. 2003. *Geographic information Analysis*. John Wiley & Sons, USA, pp.80–81.
- Smith, M.J., M.F. Goodchild and P.A. Longley. 2007. *Geospatial Analysis*. Matador, USA, pp.79–80.
- Soriano, J.A., L. Vinas, M.A. Franco, J.J. Gonzalez, L. Oritz, J.M. Bayona and J. Albaiges. 2006. Spatial and temporal trend of petroleum hydrocarbons in wild mussels from the Galician coast(NW Spain) affected by the Prestige oil spill. *Science of the Total Environment* 370(2006):80–90.
- Wattayakorn, G., B. King, E. Wolanski and P. Suthanaruk. 1998. Seasonal dispersion of petroleum contaminants in the Gulf of Thailand. *Continental Shelf Research* 18(1998):641–659.
- Wong, D.W.S. and J. Lee. 2005. *Statistical Analysis with Arcview GIS*. John Wiley & Sons, USA, pp.35–50. 