

해수면 난류수 유동방향 탐지를 위한 지구통계학적 분석기법 적용

최현우^{1*} · 김현욱¹

Application of Geostatistical Analysis Method to Detect the Direction of Sea Surface Warm Flows

Hyun-Woo CHOI^{1*} · Hyun-Wook KIM¹

요 약

최근 울진원자력 발전소에 대량의 해파리가 유입되어 냉각용수 공급을 위한 취수구를 막고 발전 장애를 일으키는데, 이에 대한 사전 방지 대책 중 하나로 해양생물 대량유입의 감시 및 예보의 필요성이 제기되고 있다. 자체 이동 능력이 약한 보름달 물해파리와 같은 해양생물체에 대해서는 해수유동이 중요한 유입 요소로 작용하며, 울진주변해역에서 표층 해류방향이 북서향일 때에는 대마 난류를 타고 올라온 해파리가 발전소 쪽으로 이동하여 피해를 주게 된다. 난류수의 유동방향 탐지를 위해 울진해역 25km x 25km 공간범위를 설정하여 NOAA 해수면온도 관측자료를 수집하였다. 통계적 분석을 위해 수온자료는 GIS point 데이터로 만들고 ArcGIS의 geostatistical analyst를 사용하였으며, 수온 point 데이터에 대해 방향성 반베리오그램(directional semivariogram) 계산과 이방성(anisotropy)으로 해수면 난류수 유동방향을 탐지하였다. 이러한 실험적 결과는 발전소 취수구에 해양생물 대량유입을 감시하는 요소기술로 해파리유입 조기경보시스템 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

주요어: 방향성 반베리오그램, 이방성, 난류해수 방향, 해파리 대량유입, 발전소

ABSTRACT

In recent years, an ingress of mass jellyfish into cooling water intake system causes interruption of electric power production at the Uljin nuclear power plant. Therefore, monitoring and forecast on the mass ingress of marine organisms are demanded as one of the early preventing measurements. Sea water movement is a major factor on the ingress of marine organisms like Moon jellyfish which has weak self-mobile ability. When sea surface flow direction adjacent to the Uljin is the northwest, the jellyfish on the Tsushima warm currents move to the Uljin power plant. To detect the direction of sea surface warm flows, the spatial range with 25km x 25km is set up and NOAA sea surface temperature(SST) data are collected in this area. For the statistical analysis, the SST data are made as

2006년 2월 7일 접수 Received on February 7, 2006 / 2006년 3월 24일 심사완료 Accepted on March 24, 2006

¹ 한국해양연구원 데이터운영팀 Data Management Section, Korea Ocean Research & Development Institute

* 연락처 E-mail : hwchoi@kordi.re.kr

GIS point data and geostatistical analysis of ArcGIS is used. Analyzing directional semivariogram, the anisotropy of the SST point data are calculated and warm flow direction is detected. This experimental results are expected to use as an element technology for the early warning system development of mass jellyfish ingress in power plant.

KEYWORDS: *Directional Semivariogram, Anisotropy, Warm Sea Flow Direction Jellyfish Ingress, Power Plant*

서론

최근 지구온난화의 영향 등으로 지구환경이 변함에 따라 우리나라 해양환경도 아열대성 환경으로 변화되고 있으며, 이로 인해 해파리의 출현도 빈번해져 수산업 뿐 아니라 해수를 냉각수로 사용하는 발전소에도 지장을 초래하고 있다. 발전소의 해파리에 의한 피해는 전세계인 현상으로 일본에서는 도쿄만에서 기록된 해양환경 자료를 발전소 취수구 유입해양생물에 의한 발전소 사고 시기와 연관지어 정성적인 환경요인분석을 시도한 바 있으며, 인도의 마드라스 원자력발전소에서는 해파리 유입을 경보하기 위해 취수구에 유입된 해파리

량과 냉각 취수용 해수의 수압차와의 관계를 분석한 바 있다(Masilamoni 등, 2000).

동해연안에 위치한 울진원자력발전소의 경우 지난 6년(1998~2003)간 취수로에서 수거된 해파리의 유입현황을 살펴보면, 총 2,191일 중 취수구에서 수거된 해파리가 1t 이상 되는 날은 820일로 평균 2.7일에 한 번꼴로 유입되었다. 이 중, 10t 이상 출현일수는 342일, 50t 이상 출현일수는 89일, 100t 이상 출현일수도 43일이나 되었다(한국해양연구원, 2004). 유입되는 해파리양이 적을 때에는 취수로에 설치된 그물망으로 일차적인 제거가 가능하지만, 대량유입 될 때는 취수구를 막아 발전소의 가동에 장애를 주게 된다.

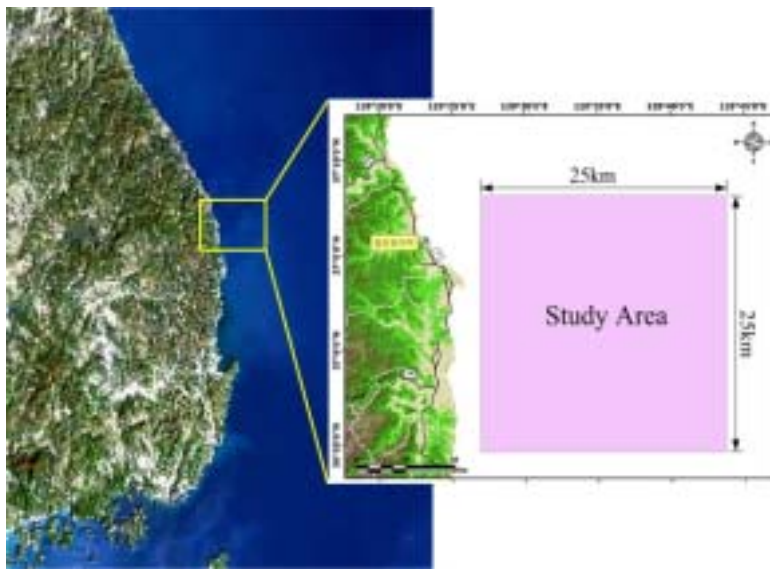


FIGURE 1. Study sea area adjacent to Uljin (25km x 25km)

해양생물이 발전소에 대량 유입되는 현상은 다양한 해양 환경적 요소가 복합적으로 작용하여 아직 뚜렷한 원인규명이 이루어지지 않았지만, 자체 이동 능력이 약한 보름달 물해파리와 같은 해양생물체에 대해서는 해수유동이 중요한 요소로 작용한다. 울진원전의 남부지역인 죽변해역의 표층수가 발전소 쪽으로 향하는 북서향의 해류일 때에는 대마난류의 지류인 동한난류를 타고 올라온 해파리가 발전소 쪽으로 이동하여 피해를 주게 된다.

따라서, 해파리 유입에 대한 모니터링과 사전 예측을 위해서는 해류 방향의 탐지가 중요하게 되며, 이에 대한 해결기법으로 NOAA 표층수는 분포의 방향성을 지구통계학적 기법인 방향성 반베리오그램(directional semivariogram)과 이방성(anisotropy)을 분석하는 실험적 연구를 수행하였다. 아울러, 국립해양조사원의 ADCP(acoustic doppler current profiler) 관측자료를 분석하여 울진연안의 일반적인 해류패턴을 분석하였다.

실험적 연구해역은 그림 1과 같이 울진 죽변 연안에서 동해 외해 쪽으로 약 30km 떨어진 해역 내에서 동한난류수가 울진원자력발전소에 영향을 미칠 수 있는 25km x 25km 범위를 설정하였다.

연구자료 및 방법

울진죽변 주변해역의 일반적인 해류특성을 파악하기 위해 지난 5년간(2000.12 ~ 2005.10) 국립해양조사원에서 관측한 격월 ADCP 해류자료를 사용하였다(국립해양조사원, 2005). 해류특성 파악을 위해 울진죽변 주변해역의 37°N 선상에서 연안에서부터 수평으로 131°E 까지 6 ~ 25시간 연속횡단 관측한 ADCP 자료 중 표층수심(10m ~ 28m)층에서 관측한 3개 구간(1구간: 129°32.5' E ~ 129° 37.5' E, 2구간: 129° 37.5' E ~ 129° 42.5' E, 3구간: 129° 42.5' E ~ 129° 47.5' E)의 자료를 사용하였다(그림 2).

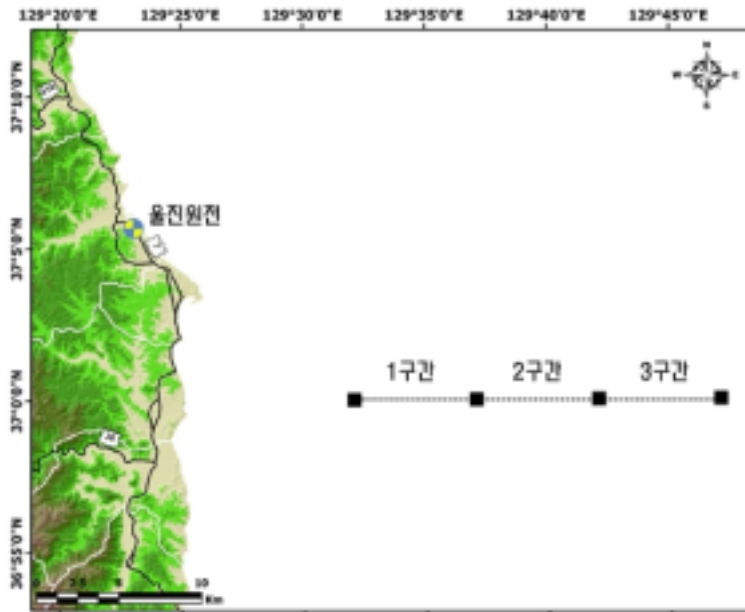


FIGURE 2. ADCP observation spatial ranges from National Oceanographic Research Institute

해류특성을 정량적으로 파악하고자 북쪽을 0°로 하고 ±22.5°의 허용한계로 시계방향으로 45°씩 증가시켜 유향을 8방위로 구분하였다. 각 구간 평균 관측자료의 해류 방향별 빈도수와 평균유속를 구하여 연구해역을 흐르는 표층해류의 방향과 유속 특성을 통계표와 차트로 정리하였다.

NOAA AVHRR 위성의 해수면온도(SST)자료의 공간해상도는 약 1.1km이며 기상(구름 등) 조건이 허락하는 한 매일 관측한 자료를 활용할 수 있다. 본 적용실험을 연구해역 25km x 25km 영역에서 관측한 NOAA SST 3개의 자료 셋(관측일: 2000년 12월 4일, 2001년 4월 3일, 2002년 10월 24일)을 활용하였으며, 각 관측일의 자료는 그림 3과 같이 지구통계학적 분석을 위해 529개의 GIS point 데이터로 만들었다.

해수면 수온 point 데이터는 ArcGIS의 geostatistical analyst를 이용하여, 수온분포에

대한 공간적 변화패턴을 분석하고 표층난류수의 방향 탐지에 적용하였다. 공간 추정 통계기법으로 사용하는 반베리오그램을 계산하고, 여기에다 방향성을 고려한 방향성 반베리오그램을 적용하였다. 베리오그램(variogram)이란, 아래의 식처럼 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도이며, 일정거리(d) 떨어진 두 자료들 간의 차이를 제공한 것의 기대 값이다.

$$2\gamma(d) = E[(z(x) - z(x+d))^2]$$

즉, 공간적으로 서로 떨어져 있는 자료들이 평균적으로 얼마나 다른지를 알고자 할 때 사용되며, 거리가 가까울수록 그 값들이 비슷하므로 일반적으로 작게 나타나고 거리가 멀어질수록 그 값이 크게 나타나는 것이 일반적인 경향이다(최종근, 2002). 즉, 객체 속성간의 공간적인 종속성을 탐색하는데 유용한 방법으로 사용된다(O'Sullivan과 Unwin, 2002).

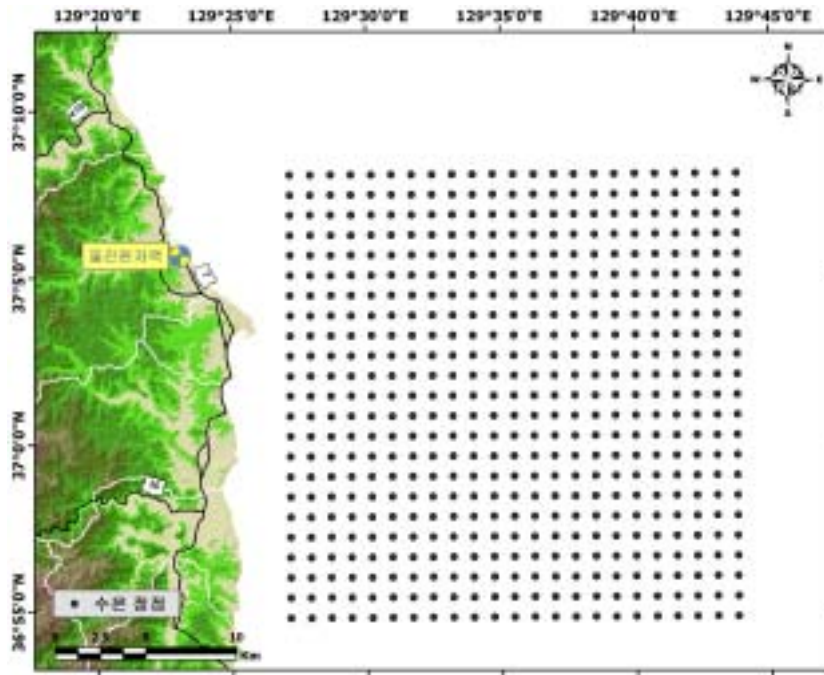


FIGURE 3. SST observation GIS data points from NOAA satellite

이러한 베리오그램의 반이되는 값을 반베리오그램이라 하며 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma(d) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [(z(x_i) - z(x_i + d))]^2$$

여기서, d = 지연거리 또는 분리거리(lag distance)로 두 관측점간에 떨어진 거리를 나타내며, n = 자료 쌍의 수, $z(x_i)$ 와 $z(x_i + d)$ 는 분리거리 내에서의 n 개의 모든 자료 쌍을 나타낸다(Wingle과 Poeter, 1993).

어떤 경우에는 반베리오그램이 방향에 따라 상당히 다를 수가 있다. 관측값의 속성이 강한 방향성을 가지고 있다면 같은 방향으로의 반베리오그램은 거리에 따라 차이가 없지만 교차하는 방향으로서는 거리에 따라 차이가 심하게 된다. 즉, 위와 같은 등방성 베리오그램을 이용하면 방향성을 지닌 특징을 잘 나타내기가 어렵다. 따라서 일정한 방향에 따라 분리거리 만큼 떨어진 자료를 이용하여 이방성 베리오그램을 계산할 수 있다(최종근, 2002). 이방성이란 두 지점간의 거리와 방향의 변화에 따라 공간적으로 종속성이 있는 공간처리 또는 데이터의 특성이라 정의되며 point간의 속성변화가 가장 작은 즉, 상관관계가 가장 높은 방향을 주방향이라 한다.

수온의 공간적 변화 방향은 북쪽을 0° 로 하고 45° 씩 증가시켜 네 방향(NW, N, NE, E)에 대한 방향성 베리오그램을 추출하였다. 수온 point 데이터에 대한 방향성 반베리오그램을 계산하기 위해 spherical model로 ordinary kriging 방법을 사용하였으며, 방향성 반베리오그램과 이방성 계산을 위한 조건으로 angle tolerance 45° , bandwidth 4 lags로 하였으며, NOAA SST 관측자료의 공간해상도가 약 1.1km임을 고려하여 최상의 반베리오그램 계산을 위한 lag size를 1,000m, number of lags를 10으로 지정하여 분리거리를 10km로 설정하였다. 방향성 반베리오그램을 계산하기 위해 사용한 파라미터의 다이어그램은 그림 4와 같다.

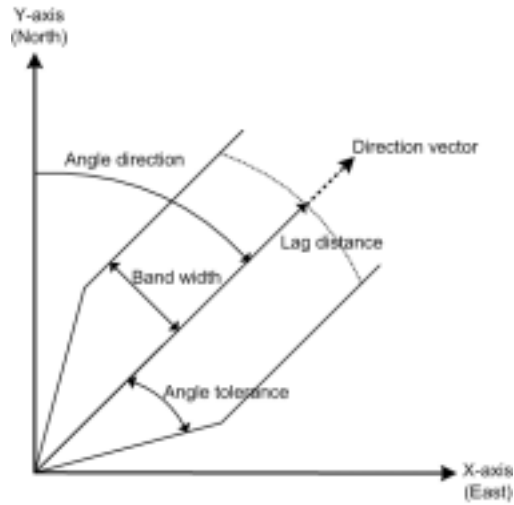


FIGURE 4. Diagram of parameters used to calculate directional semivariogram

결과 및 고찰

1. 해류 관측자료에 의한 해류현황

연구해역의 일반적인 해류현황을 파악하기 위해 국립해양조사원에서 격월(2000.12~2005.10) 관측한 ADCP 표층 해류자료를 이용하였다. 해류의 방향을 8개 방향으로 나누어 각 정점의 해류 방향별 빈도수와 평균유속을 정리하면 표 1과 같이 표층 해류의 주 방향은 북향으로 전체 발생빈도 수의 42%에 해당하며, 그 다음으로는 울진죽변 연안을 따라가는 북서향이 20%를 나타냈다. 그 외 6개 방향에 대해서는 각각 10%미만으로 미약한 결과를 보였다. 해류의 유속은 북향이 평균 47cm/s로 가장 크게 나타났고, 그 다음으로는 동향 32cm/s, 남향, 북서향, 남서향이 23~25cm/s, 그 외의 방향은 20cm/s 미만으로 약한 유속을 보였다. 울진죽변 주변해역을 흐르는 표층해류의 방향 특성과 유속을 방사형 차트로 8개 방향별로 나타내면 그림 5와 같다. 따라서, 울진죽변 연안에서의 주요 해수유동은 고온의 대마난류수가 분기되어 동해연안을 따라 흐르는

TABLE 1. Characteristics of the upper sea layer currents(Dec. 2000~Oct. 2005)

해류방향	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	계
발생빈도	38	6	8	2	8	4	6	18	90
발생율	42.2	6.7	8.9	2.2	8.9	4.4	6.7	20.0	100.0
평균유속(cm/s)	47.1	18.0	32.4	15.4	25.3	23.3	17.8	24.3	

북향성분의 동한난류의 영향이 주를 이루고 있음을 알 수 있다.

2. 지구통계학적 기법 적용 결과

연구지역에서 2000년 12월 4일, 2001년 4월 3일, 2002년 10월 24일에 관측한 NOAA SST 자료의 공간적 분포를 파악하기 위해 GIS point 데이터를 크리깅 공간추정법을 사용하여 2차원 레스터 데이터와 3차원 표면을 제작하였다(그림 6). 3개 영상의 수온 공간분포 특성이 각기 다를 수 있으므로 판단 할 수 있는데, 2000년 12월 4일에는 울진 연안이 상대적으로 저온(14℃)인 반면 외해역이 고온(18℃)이며 동한난류가 북동향으로 지나감을 알 수 있다. 2001년 4월 3일에는 울진 외해역이 상대적으로 저온(10℃)인 반면 연안역이 상대적으로 고온(13℃)이며 동한난류가 북서향으로 울

진연안을 따라 흐름을 알 수 있다. 2002년 10월 24일인 경우에는 울진 연안역과 외해역이 상대적으로 저온(17℃~19℃)인 반면 중간역이 고온(21℃)으로 동한난류가 좁은 띠를 이루며 북향으로 흐름을 알 수 있다.

이러한 가시적 결과에 의하면 수온 point 데이터의 속성값이 공간적으로 등방성을 지니지 않고 방향에 따라 속성값의 차이를 가지는 이방성 형태임을 알 수 있다. 따라서 이방성 특성을 나타내는 방향성 반베리오그램 통계기법을 이용해 난류수의 유동방향을 탐지하였다. 방향성 있는 고온의 분포특성을 분석하기 위해 ArcGIS의 geostatistical analyst에서 제공하는 이방성의 주방향을 산출하고 방향성 반베리오그램 cloud를 산출하여 방향별로 비교하였다.

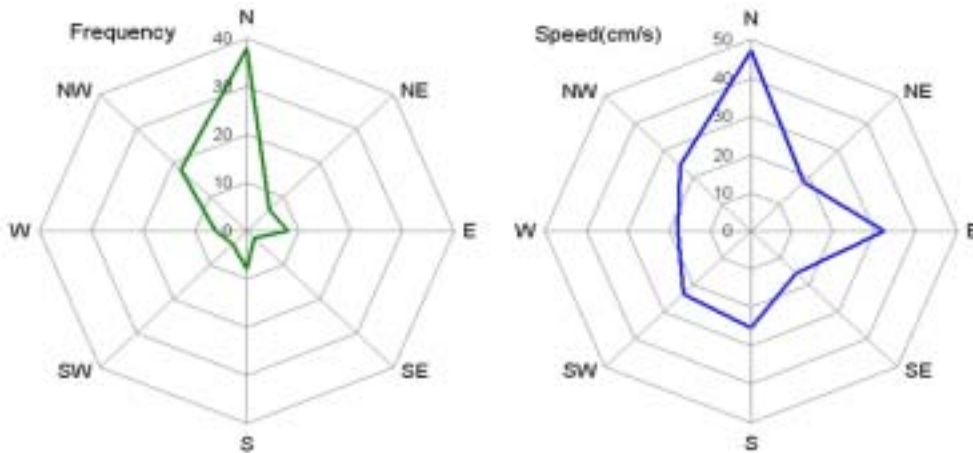


FIGURE 5. Directional frequency and mean speed of the upper sea layer currents adjacent to Uljin

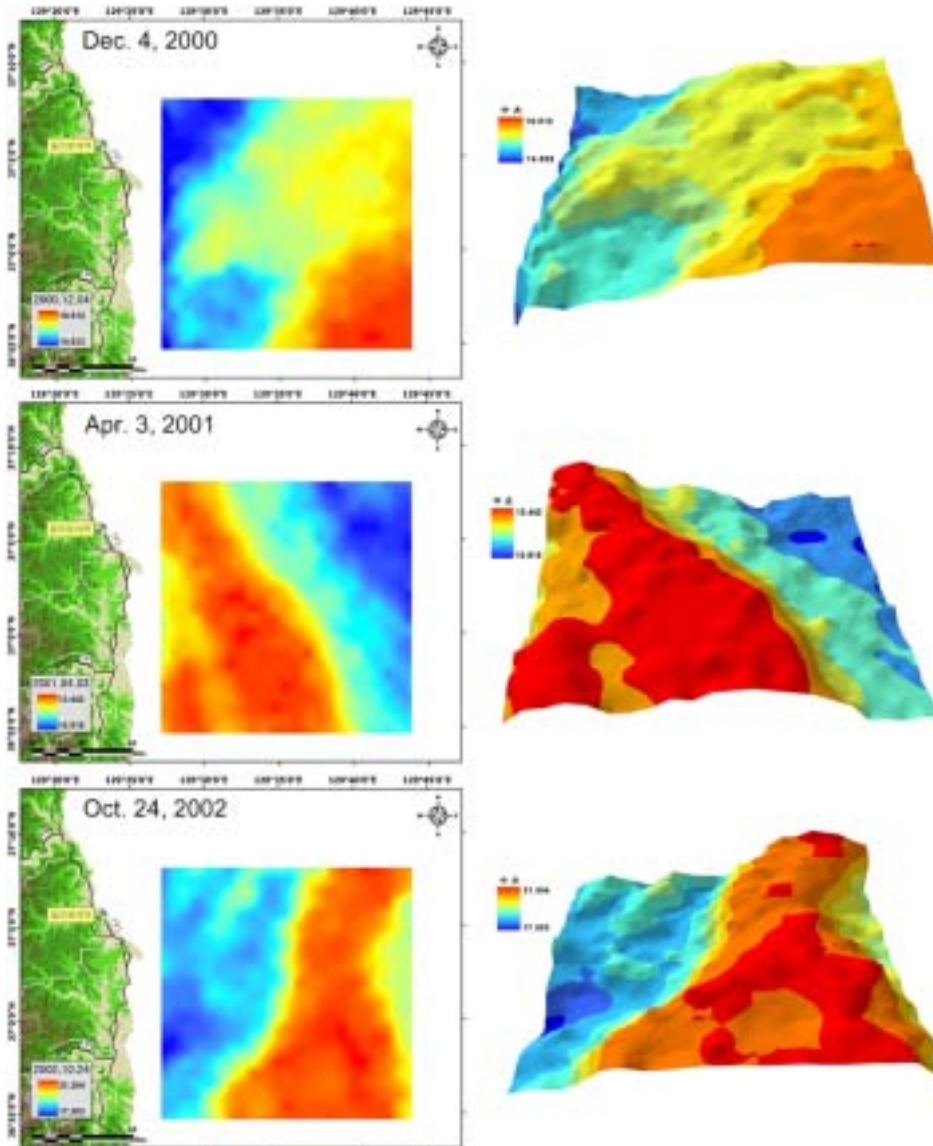


FIGURE 6. 2D raster and 3D surface Spatial distributions of SST (Dec. 4, 2000, Apr. 3, 2001 and Oct. 24, 2002)

분리거리를 10km로 설정하고 spherical model로 ordinary kriging 방법을 사용하여 방향성을 무시한 전체 반베리오그램(γ) 계산결과와 3개 영상 모두 전체적으로 분리거리가 커짐에 따라 γ 값이 커지는 경향을 보였다. 각

영상의 전체자료에 대한 이방성의 주 방향 (major direction)을 산출한 결과 2000년 12월 4일에는 27.5°로 북동향, 2001년 4월 3일에는 334.2°로 북서향, 2002년 10월 24일에는 18.8°로 북향을 나타냈다(그림 7).

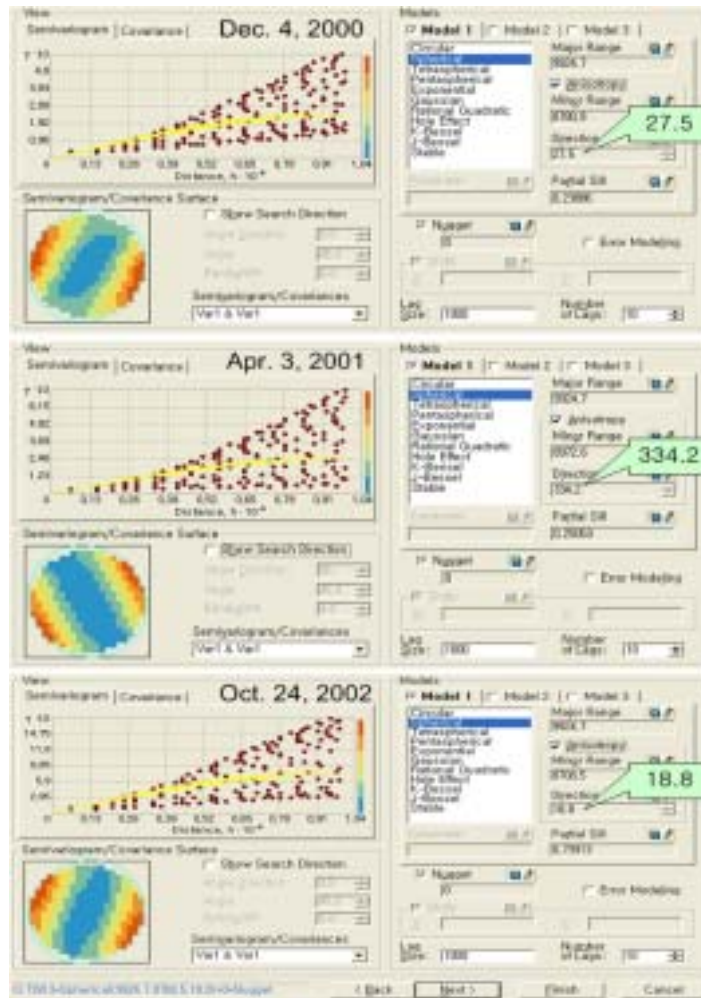


FIGURE 7. Semivariogram clouds and anisotropy major directions for all data (Dec. 4, 2000, Apr. 3, 2001 and Oct. 24, 2002)

또한, 분리거리 내에서 전체 수온 point 자료에 대한 반베리오그램 결과를 가지고 네 방향(NW, N, NE, E)에 대한 방향성 반베리오그램을 산출하였다. 그림 8과 같이 2000년 12월 4일 자료에 의하면, NW와 E 방향으로 분리거리에 따라 전체적으로 매우 강한 이방성을 보였고, N과 NE 방향으로는 약한 이방성을 보였다. N과 NE 방향으로 약한 이방성을 보이

긴 했지만, NE 방향으로의 이방성이 좀 더 약하게 나타나 고온수가 북동향으로 분포하고 따라서 난류수의 유동방향이 북동향임을 알 수 있다. 그림 9와 같이 2001년 4월 3일 자료에 의하면, NE와 E 방향으로 분리거리에 따라 매우 강한 이방성을 보였고, NW와 N 방향으로는 약한 이방성을 보였다. NW와 N 방향 중 NW 방향으로의 이방성이 좀 더 약하게 나타

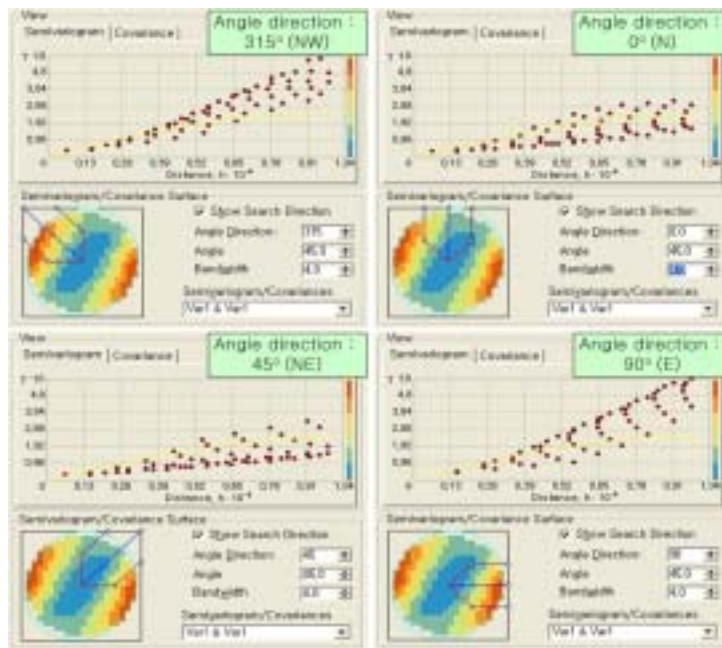


FIGURE 8. Semivariogram clouds for four(NW, N, NE and E) directions (Dec. 4, 2000)

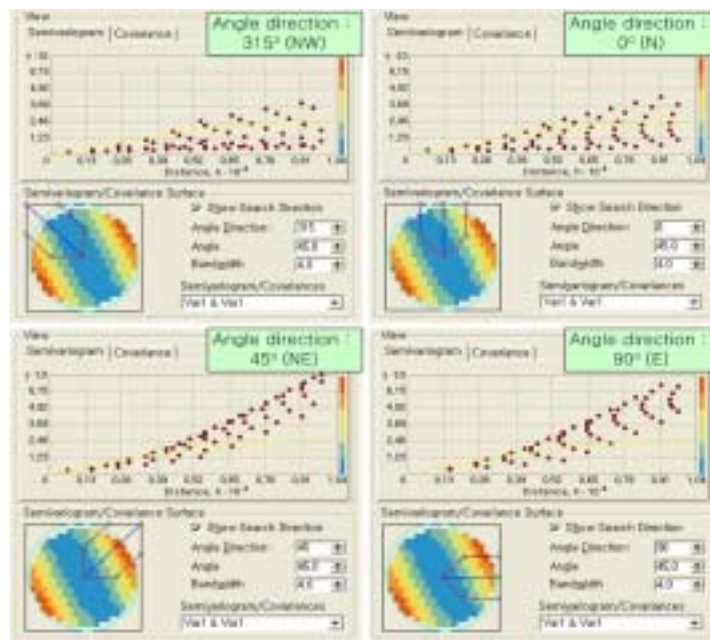


FIGURE 9. Semivariogram clouds for four(NW, N, NE and E) directions (Apr. 3, 2001)

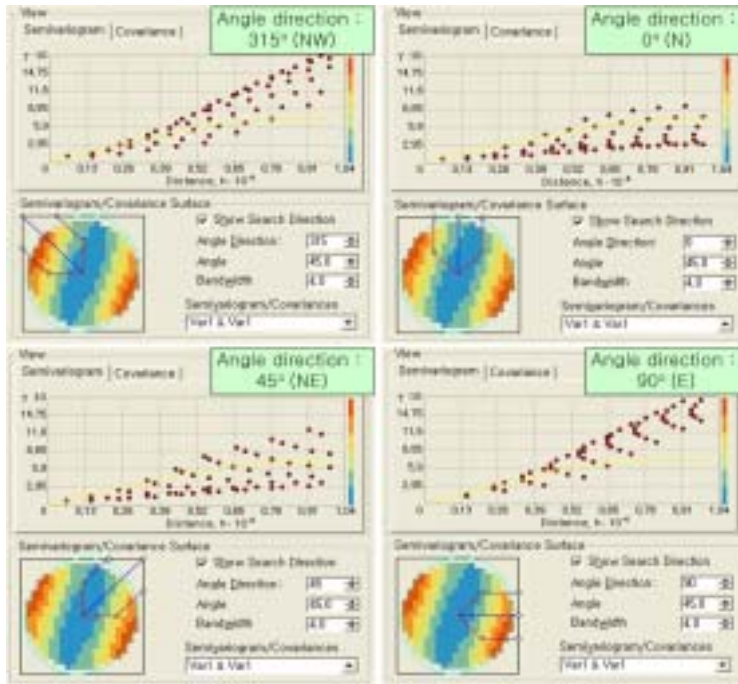


FIGURE 10. Semivariogram clouds for four(NW, N, NE and E) directions (Oct. 24, 2002)

나 고온수가 북서향으로 분포하고 따라서 난류수가 울진원전이 위치한 울진연안으로 흐르는 북서향임을 알 수 있다. 그림 10과 같이 2002년 10월 24일 자료에 의하면, NW와 E 방향으로 분리거리에 따라 전체적으로 매우 강한 이방성을 보였고, NE 또한 강한 이방성을 보인 반면 N 방향으로는 매우 약한 이방성을 보였다. 따라서 난류수가 울진 주변 해역에서 곧 바로 북쪽으로 흐름을 알 수 있다.

결론

동해 울진원자력 발전소에 피해를 주는 해파리의 유입에 대한 사전 모니터링과 예측을 위한 기법으로 방향성 반베리오그램 통계기법을 적용해 동해울진 주변해역의 해수면 난류수에 대한 유동방향 탐지를 위한 실험적 연구를 수행하였다. 울진 주변 해역에서 현장 관측된 국

립해양조사원의 ADCP 표층해류 조사자료에 의하면 년중 북향 성분의 해류가 42%, 북서향의 해류가 20%를 차지하여 남쪽에서 올라오는 대마난류수의 지류인 동한난류가 이 지역에서 지배적임을 나타내었다. 연구지역을 통과하는 동한난류수의 유동패턴을 지구통계학적 방법으로 분석하기 위해 2000년 12월 4일, 2001년 4월 3일 및 2002년 10월 24일에 관측한 NOAA SST 자료를 수집하여 GIS point 자료를 만들고 수온값을 point 자료간의 거리에 따른 상관성을 반베리오그램기법으로 계산하여 분석하였다. 이방성의 주 방향과 방향에 따른 반베리오그램을 산출하여 이방성이 약한 방향을 난류수의 유동방향으로 결정하였다. 이방성이 강한 특성을 이용하는 경우는 지하수 수압 관측자료로부터 지하수의 흐름방향을 유추할 때 수압의 공간적 변화가 심한 방향으로 결정(Orr and Dutton, 1983)하기도 하지만, 본

연구의 난류수 유동과 같이 물질의 속성값이 공간적으로 이동할 때 속성의 이동방향을 정량적으로 결정할 때도 방향성 반베리오그램의 적용이 유용함을 확인하였다. 본 실험적 연구는 향후 해양생물 대량유입에 대한 사전예측 시스템 개발에 요소기술로 적용하고 예측모델 개발에 유용한 초기모델을 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

Wingle, W. L. and E. P. Poeter. 1993. Uncertainty Associated with Semivariograms Used for Site Simulation, Ground Water 31(5):725-734.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 연구사업(PN52700)과 한국해양연구원 기본연구사업(PE97104)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 국립해양조사원. 2005. 해수의 물리적특성 정보서비스. <http://current.nori.go.kr>.
- 최종근. 2002. 공간정보 모델링. 구미서관. 286쪽.
- 한국해양연구원. 2005. 해양생물에 의한 취수구 유입생물 방지기술. 346-361쪽.
- Masilamoni, J.G., K.S. Jesudoss, K. Nandakumar, K.K. Satpathy, K.V.K. Nair, and J. Azariah. 2000. Jellyfish ingress: A treat to the smooth operation of coastal power plants. Current Science 79(5):567-569.
- Orr, E. D. and A. R. Dutton. 1983. An application of geostatistics to determine regional ground-water flow in the San Andreas Formation, Texas and New Mexico. Ground Water 21(5):619-624.
- O'Sullivan, D. and D. J. Unwin. 2002. Geographic Information Analysis, John Wiley & Sons, pp.49.