

해양 표면취송류(skin drift)의 라그랑쥐 측류 및 모델링

이문진⁽¹⁾, 강용균⁽²⁾

Lagrangian observation and modelling of sea surface wind-induced drift(skin drift)

by

Moonjin Lee⁽¹⁾ and Yong Q. Kang⁽²⁾

요 약

해양에서 해수보다 비중이 낮은 유류의 이동.확산은 해면 (0m) 유동에 따라 좌우된다. 해양에서의 유류확산에 대한 현실에 부합되는 모델 개발의 일환으로 한반도 연안역 4개 해역에서 해양 표면 취송류 (skin drift) 추정에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 해면과 수면하 1.5m의 유동을 동시 관측하여 둘간의 차이로서 바람에 의한 해양표면 취송류를 추정하였다. 표면취송류 유속의 평균 크기는 바람의 2.9% 였으며, 풍향에 대한 표면취송류 편향의 평균치는 바람의 오른쪽 18.6° 였다. 관측 결과는 표면취송류의 모델링에 활용하였다. 모델링에서는 바람에 따른 표면 취송류의 공간적 변동을 재현하였으며, 관측된 결과와 비교하여 검증하였다.

Abstract

The drift and movement of oil slick in the sea are closely related to the flows at the sea surface (at 0m depth) because specific gravity of an oil is lighter than that of sea water. As an effort toward a development of realistic model for oil spill drift on the sea surface, a study on sea surface wind-induced drift (skin drift) at 4 coastal regions of Korea was carried out. In this study, skin drifts were inferred from difference between the flow at the sea surface and that in underwater (at 1.5m depth). The average speed of skin drift in our experiments was 2.9% of wind speeds and the average direction of skin drift to wind was deflected to the right by 18.6°. The results of this experiment were used in the modelling of the skin drift as a prompt response of time-variable wind. The modelled skin drift, which corresponds to observed wind, successfully reproduced the observed trajectories of sea surface flows.

Keywords: wind-induced drift, skin drift, oil slick, Lagrangian observation

(1) 정회원, 한국해양연구소 선박해양공학분소

(2) 정회원, 부경대학교 해양학과

1. 서 론

해양에서 오염물질은 조류(tidal currents)와 취송류(wind-driven currents) 같은 평균류(mean flow)에 의해 이동하면서 난류(turbulence)에 의해 확산(dispersion)되어진다. 이와 같은 과정을 수치적으로 계산하는 해양 확산모델에서는 조류 및 취송류의 시공간적 분포가 필수적으로 요구된다. 조류와 취송류의 시공간적 분포는 주로 해수유동 수치모델을 이용하여 산정되는데, 일반적으로 조류는 비교적 쉽게 결정될 수 있으나 취송류는 바람의 불규칙성 때문에 결정론적으로 정량화하기 어렵다. 취송류의 시공간적 분포를 파악하기 위한 방법으로는 해수유동 수치모델을 이용하여 평균적인 바람이 지속적으로 작용한 경우에 대해 정상상태(steady state)의 해로서 산정하는 방법이 주로 사용된다. 그러나 실제 해양에서 바람이 지속적으로 일정하게 부는 경우는 거의 없으며, 시간에 따라 매우 불규칙하게 변동한다. 바람의 변동에 따라 취송류 역시 매우 불규칙하게 변동하며, 바람의 세기 및 방향과 지속시간에 따라 공간적으로도 매우 복잡한 양상을 보인다.

취송류는 바람과 직접 접해있는 해양 표면에서 가장 민감하게 나타나며, 해양 내부의 취송류는 해양 표면취송류(skin drift)에 대한 반응으로서 나타난다. 표면취송류와 해양 내부 취송류간의 관계는 기본적으로 해수의 연직와동점성(vertical eddy viscosity)에 의해 결정되는데, 수심이 깊어질수록 유속은 감소하고 유향은 편향된다(Csanady[1982]). 고정점 측류자료를 이용하여 취송류와 바람과의 관계를 연구한 Collar and Vassie[1978]는 영국 동해안의 고정점에서 수면하 3m에서의 취송류가 풍속의 0.9% 정도라고 제시한 바 있다. 해양 표면취송류는 유속에 있어서도 가장 크게 나타나지만, 바람에 대한 반응시간에 있어서도 가장 빠르게 나타난다. 바람에 대한 반응시간에 있어서 표면의 취송류는 바람의 순간적인 변동에 대해서도 즉각적인 변동을 보이는데 비하여, 해양 내부의 취송류는 수심이 깊어질수록 반응시간이 늦어지는 양상을 보인다. 해수의 난류적 점성만을 고려하였을 때, 표면 흐름의 영향이 수심 10m 까지 전파되는데는 약 2시간이 소요된다(Pedlosky[1979]). 즉 해양 내부의 취송류는 일정기간 바람이 지속되었을 때 발생되며, 바람의 지속시간에 대한 취송류의 반응 정도는 수심에 따라 다르다. 한국의 진해만에서 지상 10m 풍속과 수면하 7m의 고정점 유속간의 관계를 조사한 이[1994]의 연구에서는 1일 이상의 시간 규모에

대해서 바람과 취송류가 좋은 상관을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 취송류를 실제와 부합되게 다루기 위해서는 바람에 대한 표면취송류의 반응이 일차적으로 다루어져야 한다. 바람과 관련된 해양 표면의 흐름은 해양의 취송류 특성 파악에도 중요하지만, 유류와 같이 해양표면에 부유하여 이류 확산되는 물질의 확산예측과 같은 현실적인 문제에서도 매우 중요하다. 바람과 해양표면 흐름간의 관계는 과거의 연구들에서 이미 여러차례 밝혀진 바 있다. 해상에 표류카드(drift card)나 기타 부유물을 띄우고 이들의 이동을 추적하여 표면유동을 추적한 과거의 연구들에서 결과는 주로 풍속과 유속간의 비 그리고 풍향과 유향간의 관계로 정리되었다. Bowden[1983]은 1967년 영국 남서단의 Lands End 부근 해역에서 Torrey Canyon으로부터 유출된 유류의 이동경로에 근거하여 표면유속과 풍속간의 비가 3.4%라고 제시하였다. 실험실, 호수, 해양 등지에서 행해졌던 여러 연구들의 결과를 요약한 연구에서 Lange and Hühnerfuss[1978]는 표면유속이 풍속의 $4.4 \pm 0.9\%$ 에 해당된다고 밝혔다. 이외의 여러연구들에서도 해양표면의 흐름은 해상풍의 3%정도에 해당되는 유속 크기를 갖는다고 밝히고 있다(Gill[1982]). 해양표면의 흐름에는 바람 영향이외에 주변해역의 조류나 해류의 영향도 무시할 수 없을 정도로 크게 작용된다. 바람에 의한 해양표면의 반응을 보다 타당성있게 고찰하기 위해서는 표면 흐름중 순수 취송성분만 추출하여 바람장과 비교하는 연구가 수행되어야 할 것이다. 이러한 결과는 조류모델의 결과를 이용한 유류확산모델에 취송류 영향을 추가하기 위한 입력조건으로도 필요하다. 현재 유류확산모델에서 바람의 영향은 풍향과 일정한 방향으로 풍속의 3% 크기를 갖는 것으로 고려하고 있다(류 등[1998]).

본 연구에서는 해양 표면의 흐름을 라그랑주(Lagrange)식으로 관측하고, 이로부터 바람에 의한 순수 취송성분만을 추출하여 해상풍과 해양표면취송류간의 관계를 추정하고자 한다. 또한 분석된 결과를 이용하여 해양표면취송류의 공간분포를 재현하고 실제 관측자료와 비교하여 검증함으로써, 유류확산모델링시 보다 타당성있게 바람의 영향을 취급할 수 있는 모델링 방법을 제시하고자 한다.

2. 해양표면류 관측

2.1 실험방법

본 연구에서 해양 표면취송류는 해양 표면(0m)의

흐름과 내부의 흐름(수면하 1.5m)을 동시에 관측하여 둘간의 차이로서 추정하였다. 이를 위하여 해양 표면의 흐름을 반영할 수 있는 부표와 내부의 흐름을 반영할 수 있는 부표를 동일지점에 동시에 투하하여 이들의 경로를 추적하였다. 해양 표면 흐름의 측류를 위한 부표는 0.5cm의 두께를 갖는 40cm x 40cm 크기의 판자를 사용하였으며, 해양 내부의 흐름은 수면하 1.5m에 40cm x 40cm 크기의 'X'형 날개를 측류판으로 부착한 표층용 부표를 사용하여 관측하였다. 실험에서 부표의 해상풍에 의한 직접적인 밀림 현상을 최소화하기 위하여 표면용 부표인 판자는 수면위로 노출되는 부분이 없도록 하였으며, 수면하 1.5m의 표층용 부표는 해상에서 식별을 위한 깃발만이 해면위로 노출되도록 하였다.

실험결과에서 표면 취송류는 Fig. 1의 모식도에

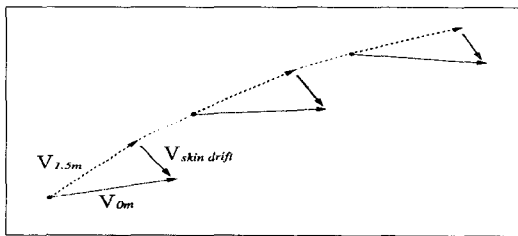


Fig. 2 Schematic representation for the estimation of skin drift associated with flows at sea surface (0m) and at 1.5m depth.

제시한 바와 같이 표면 (0m) 유속으로부터 해양 내부(1.5m 유속)의 유속을 제거함으로써 추정하였다. 이러한 방법을 적용하기 위해서는 해양 내부 흐름의 공간적 균일성(Homogeneity)이 확보되어야 하는데, 이는 실험의 공간적 규모를 수 백m 이내로 제한함으로써 충족될 수 있도록 하였다. 수 백m 이내의 공간적 규모에서 부표의 이동경로를 추적하기 위해서는 보다 정밀한 측위장치가 필요하므로, 본 연구에서는 수 m 정도의 측위오차를 갖는 Decca Trisponder (미국 Del Note사)를 사용하였다.

2.2 부표추적실험

표면취송류 추정을 위한 부표추적실험은 1994년 2월~11월에 걸쳐 한국 동해안의 울진, 월성, 고리 그리고 서해안의 영광에서 수행되었다. 각 관측지의 위치는 Fig. 2와 같다. 각 관측지별 관측횟수는 고리 4회, 월성 3회, 영광 2회, 울진 2회 등이며, 각각의 관측에서 소요시간은 1시간~1시간 30분 정도

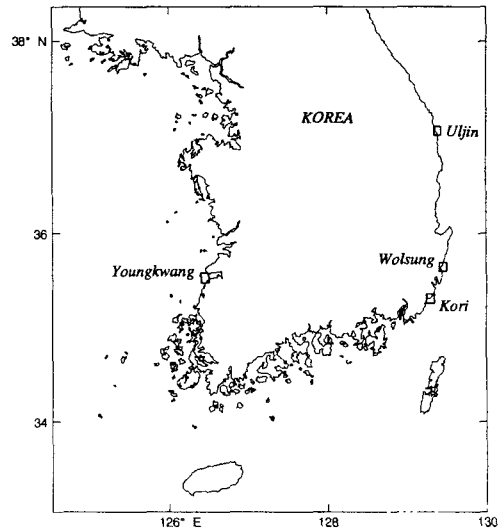


Fig. 3 Regions of our experiments.

였다. 각각의 관측마다 2~3회의 반복실험을 수행하였는데, 수행된 실험의 총 횟수는 31회이다. 실험에서 부표의 이동경로는 매 1분~2분마다 측정하였다. 본 연구에서 수행된 부표추적실험에 관한 세부 사항은 Table 1과 같다.

실험기간 중 바람자료는 주변의 발전소에 위치한 기상관측소에서 관측된 매 15분 간격의 10m 바람 자료를 이용하였다. 바람자료에서 풍향은 16방위로 구성되어 있다.

3. 관측자료 분석결과

3.1 표면취송류 추정

표면취송류는 1~2분간격으로 관측된 판자 및 부표의 시간에 따른 변위로부터 계산한 해양 표면 및 수면하 1.5m 유속간의 차이로서 추정하였으며, 매 15분 간격으로 평균하여 풍속자료와 비교하였다. 표면취송류와 10m 해상풍을 비교한 결과 둘간에는 비교적 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

부표추적실험 결과 중 1994년 2월 15일 고리해역의 부표 이동경로는 Fig. 3과 같다. 조사당일 바람은 북풍이 우세하였다. 부표추적실험은 11:52~13:28의 1시간 36분동안 3회에 걸쳐 수행하였으며, 각각의 실험에서 표면의 판자 이동경로 (Fig. 3의 실선)는 약 400m 정도였고 부표의 이동경로 (Fig. 3의 점선)는 약 1Km 정도로 나타났다. 관측된 부

Table 1 Summary of experiments to estimate skin drift

Area of experiment	Date of experiment (Moon age)	Numbers of experiment	Durations of each experiment
Uljin	Apr. 19, 1994 (8.1)	2	33, 26 mins
	Jul. 29, 1994 (20.2)	3	23, 29, 40 mins
Wolsung	Feb. 17, 1994 (6.5)	3	29, 27, 27 mins
	Jul. 28, 1994 (19.2)	2	32, 27 mins
	Nov. 24, 1994 (20.6)	3	28, 33, 44 mins
Kori	Feb. 15, 1994 (4.5)	3	30, 30, 35 mins
	May 10, 1994 (29.1)	3	26, 32, 30 mins
	Aug. 17, 1994 (9.8)	3	30, 34, 44 mins
	Nov. 22, 1994 (18.6)	3	25, 30, 26 mins
Youngkwang	Apr. 26, 1994 (15.1)	3	32, 36, 24 mins
	Aug. 23, 1994 (15.8)	3	30, 33, 29 mins

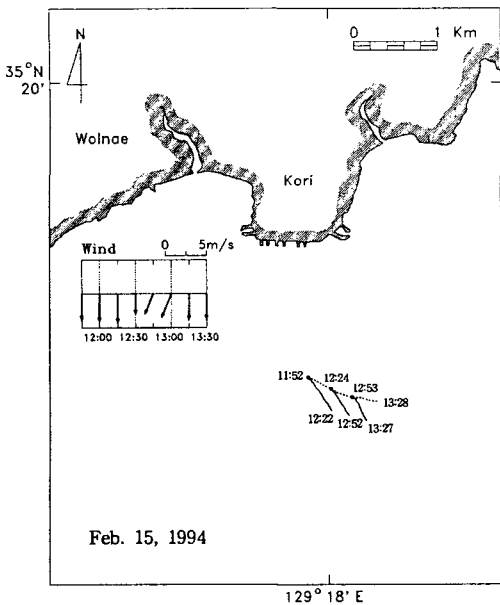


Fig. 4 Trajectories of panel and drifter off the coast of Kori (Feb. 15, 1994).

표이동경로로부터 추정한 매 15분마다의 표면취송류 유속과 동일 시간의 풍속은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 표면취송류의 유속은 실선으로 나타내었으며, 풍속은 10% 크기로 축소하여 점선으로 나타냈

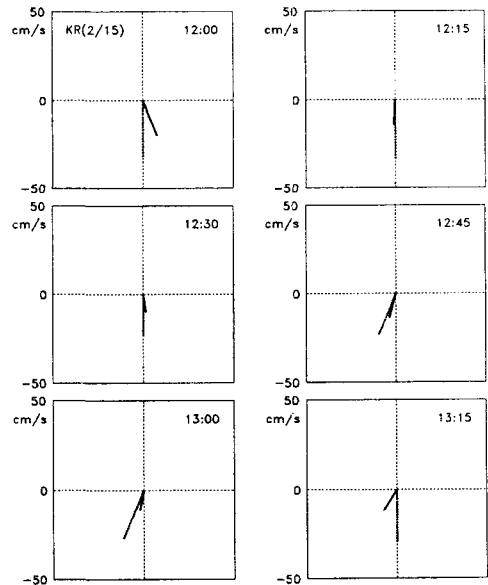


Fig. 5 Velocities of skin drift (solid line) and wind velocities (dotted line) off the coast of Kori at Feb. 15, 1994. Wind velocities are represented by 10% scale.

었다. 고리해역에서 관측된 표면취송류 유속은 풍속의 약 3% 정도를 보였으며, 유향은 대체로 풍향과 거의 같은 방향으로 나타났다 (Fig. 4).

3.2 바람과 표면취송류간의 관계

바람과 표면취송류 유속간의 관계를 알아보기 위하여, 둘간의 상호상관계수 및 선형회귀관계를 계산하였다. 매 15분별 풍속 및 추정된 표면취송류 유속의 자료는 총 67개인데, 영광의 경우 기상관측소가 내륙 깊숙히 위치한 관계로 바람자료가 실제 해상풍과 차이가 있을 것으로 생각되어 통계처리에서는 제외하였다. 영광을 제외한 총 자료수는 55개이다. 풍속과 표면취송류 유속간의 상호상관계수는 0.2로 나타났다.

표면취송류와 풍속간의 선형회귀관계는

$$Y = A \times X$$

의 관계에 근거하여 추정하였다. 여기서 Y는 표면취송류 유속이고, X는 풍속이다. 상수 A는 최소자승법을 이용하여 계산하였다. 선형회귀에 의한 풍속과 표면취송류 유속간의 관계는

$$\begin{aligned} \text{표면취송류 유속 (Skin drift)} &= \\ &0.029 \times \text{풍속 (Wind)} \end{aligned}$$

로 나타났다. 여기서, 유속 및 풍속의 단위는 cm/s이다. 즉 표면취송류의 유속은 10m 해상풍 풍속의 2.9%에 해당되는 크기를 갖는다. 실측된 유속과 선형회귀식에 의해 풍속으로부터 계산된 유속간의 차이는 $\pm 14\text{cm/s}$ 의 범위를 보였으며, 평균이 1.6cm/s 이고 표준편차가 5cm/s 인 정규분포의 특성을 보였다 (Fig. 5).

표면취송류의 유향은 대체로 풍향의 오른쪽으로 편향되는 것으로 나타났는데, 유향과 풍향의 차이는 $\pm 90^\circ$ 이내의 범위를 보였다. 유향과 풍향간에 $\pm 90^\circ$ 이내의 차이를 보이는 것은 양자가 위상 평면상에서 적어도 같은 반평면상에는 존재함을 의미한다. 평균적인 표면취송류의 유향은 풍향에 대해 오른쪽으로 18.6° 편향되어 나타났으며, 표준편차는 53.7° 로 나타났다 (Fig. 6).

4. 표면취송류 시뮬레이션

4.1 표면취송류의 공간분포 재현

바람과 표면취송류간의 관계를 이용하여 실험이 수행된 해역 중 고리 주변해역을 대상으로 표면취송류의 공간분포를 재현하였다. 표면취송류의 재현을 위한 계산 격자망은 200m 등간격격자로 구성하였다.

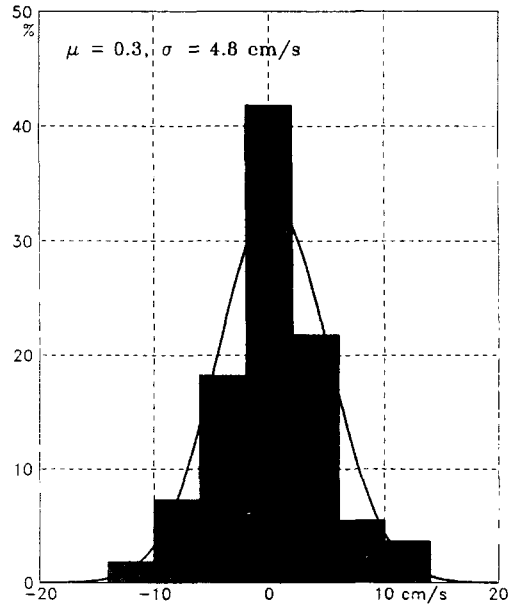


Fig. 6 Histogram of the differences between the observed speeds of skin drift and the calculated values as a function of wind speed.

표면취송류의 재현을 위한 바람은 10m/sec의 북풍으로 설정하였으며, 전 해역에서 동일하게 부는 것으로 가정하였다. 계산 격자 중 해안에 해당하는 모든 점에서 표면취송류는

$$\begin{aligned} \text{표면취송류 유속} &= 0.029 * \text{풍속} \\ \text{표면취송류 유향} &= \text{풍향} + 18.6 \end{aligned}$$

와 같이 풍속과 풍향에 대한 관계식을 적용하여 계산하였다. 다만 연안에 인접한 격자에 대해서는 육지경계를 적용하여 연안에 의한 해수유동의 변형을 표현할 수 있도록 하였다. 육지경계조건은 해안에 수직인 흐름에 대해 유속을 "0"로 설정하였으며, 연안에 평행한 흐름에 대해서 주변의 유속 구배 (gradient)와 균일(uniform)한 유속 구배를 갖는 것으로 지정하였다.

이러한 방법을 이용하여 재현한 고리주변해역의 표면취송류 분포는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 연안에서 멀리 떨어진 지점의 유속은 풍속의 3%를 만족한다.

4.2 시뮬레이션 결과의 검증

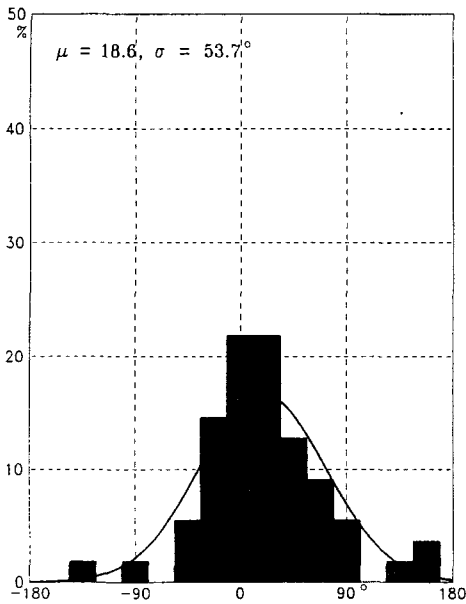


Fig. 7 Histogram of the differences between the direction of skin drift and that of wind.

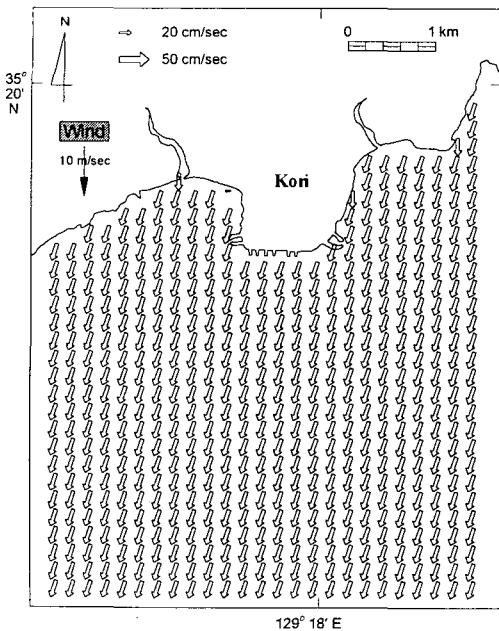


Fig. 8 Simulated skin drift off the coast of Kori.

재현된 표면취송류의 타당성을 검토하기 위하여 실

제 관측된 자료와 비교하였다. Fig. 8은 1994년 2월 15일 고리해역에서 관측한 부표 이동경로를 이용하여 추정된 해양 표면취송류와 동일한 바람자료를 이용하여 재현된 표면취송류를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 점선은 관측된 표면취송류이며, 실선은 재현된 표면취송류이다. 그림에서 나타난 바와 같이 재현된 표면취송류는 관측된 표면취송류와 비교적 비슷한 양상을 보였다. 재현된 표면취송류와 관측된 표면취송류는 유속에 있어서 약 15% 정도의 차이가 있었으며, 유향에 있어서 약 $\pm 20^\circ$ 의 차이를 보였다.

5. 결론 및 고찰

해양 표면과 수면하 1.5m의 흐름을 라그랑쥐식으로 측류하여 둘간의 차이로서 표면취송류를 산정하였다. 표면취송류 추정 결과 유속은 풍속의 2.9%에 해당하는 크기를 가지며, 유향은 풍향의 오른쪽으로 18.6° 만큼 편향되는 것으로 나타났다. 추정된 표면취송류를 이용하여 실제 관측된 바람과의 관계를 도출하였으며, 도출된 관계식을 이용하여 실제 해역에 대한 표면취송류를 재현하였다. 재현된 취송류는 관측된 취송류와 비교적 유사하게 나타났다. 재현된 취송류와 관측된 취송류간의 차이는 유속에서 약 15% 정도로 나타났으며, 유향에서 약 $\pm 20^\circ$ 로 나타났다.

본 연구에서 산정된 바람과 해양 표면취송류간의 관계는 해양의 취송류가 해상풍의 3% 정도의 크기를 갖는다는 과거 연구들의 결과와 비슷한 것이다. 이러한 관계를 이용한 표면취송류의 재현에서는 관측된 표면취송류를 비교적 잘 재현하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구의 결과에서 풍속과 표면취송류의 유속은 0.2 정도의 비교적 작은 상호상관계수를 갖는 것, 풍향과 유향간의 차이가 크게 나타나는 것 등은 문제점으로 나타났다. 이러한 문제점은 크게 두가지 원인에 의한 것이다. 첫째는 표면의 흐름과 수면하 1.5m의 흐름간의 차이로서 표면취송류를 산정하였는데, 수면하 1.5m의 흐름에도 바람에 의한 취송류 성분이 포함되어 있다는 점이다. 두번째 원인으로서는 본 연구에 사용된 바람자료가 해상풍의 자료가 아니고, 인근 육상의 기상관측소에서 얻어진 자료인 점이다. 실험해역 인근에 위치한 기상관측소에서 관측된 자료이기는 하지만, 육상의 지형 영향이나 관측 고도의 영향으로 해상풍 자료와 다소 차이가 있을 것으로 생각된다. 이러한 문제점을 배제하기 위해서는 수면하 1.5m가 아니라 보다 취송류의 영향이 적은 수심의 유속을

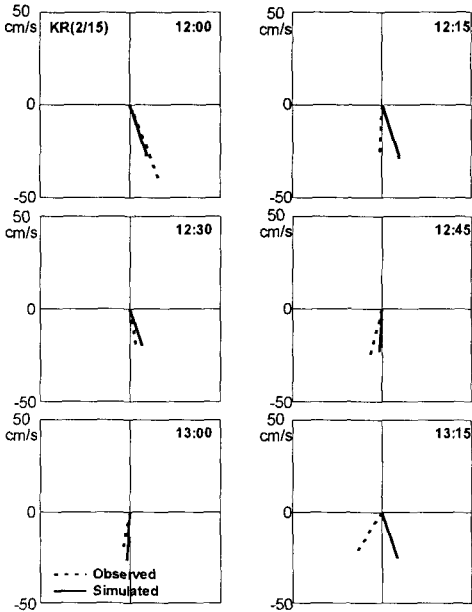


Fig. 9 Velocities of simulated skin drift (solid line) and observe skin drift (dotted line) off the coast of Kori at Feb. 15, 1994.

기준으로 한 표면취송류의 추정이 필요하며, 기준 수심에서의 취송류 성분에 대한 정량적 고찰이 먼저 이루어져야 할 것이다. 풍속자료에 의한 오차는 실제 해상풍을 선박이나 인근 해안에서 관측함으로써 줄일 수 있으리라 기대된다. 그러나 이와 같이 관측기술을 개선 하더라도 상술한 문제점을 완전히 해결하는 데는 현실적인 어려움이 있다. 취송류의 영향을 완전히 배제할 수 있는 기준 수심의 선정 문제는 바람 지속시간과 풍속에 따라 달라지므로 절대적인 기준 수심의 결정은 불가능하다. 또한 정확한 해상풍의 관측을 위해 선박에서 바람을 측정한다 하더라도 선박의 밀립현상이나 풍향 결정 등의 문제가 있으므로 정확한 해상풍의 관측 역시 어려움이 있다. 따라서 상술한 문제의 해결은 관측기술의 개선에 의한 것보다는 누적된 많은 자료를 통계

처리함으로써 오차의 영향을 최소화하는 것이 최적의 방안이라 생각된다.

현재의 단계에서 본 연구의 결과는 바람과 표면취송류간의 관계를 밝히는데 의의가 있지만 좀더 많은 횡수의 관측이 수행된다면 보다 타당성있는 결과가 도출될 수 있으리라 기대된다. 본 연구에서 산정된 바람과 표면취송류간의 관계와 이를 이용하여 표면취송류를 재현한 모델은 유류누출과 같은 해양의 오염사고에 대한 해양오염확산모델에 취송류 산정 모델로 사용될 수 있다. 이러한 결과를 이용하면 확산모델에서는 표면취송류의 세기 및 방향을 바람자료로부터 직접 추정하여 신속하게 지정할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에 추가적으로 표면에서의 확산특성을 관측할 예정이며, 취송류에 의한 이류 및 확산의 영향을 고려한 유류확산모델의 개발을 궁극적인 목적으로 하고 있다.

참고문헌

- [1] 류청로, 김종규, 설동관, 강동욱, 1998, "한국 동남해역에서의 유출유 확산예측모델", 한국해양환경 공학회지, 제1권, 제2호, 52-59.
- [2] Bowden, K.F., 1983, Physical oceanography of coastal waters. Ellis Horwood, Chichester, 302pp.
- [3] Collar, P.G. and J.M. Vassie, 1978, "Near surface current measurements from a surface-following data buoy (DB1)", Part 2. Ocean Engng., Vol. 5, 291-308.
- [4] Csanady, G.T., 1982, Circulation in the coastal ocean. D. Reidel Publ., 279pp.
- [5] Gill, A.E., 1982, Atmosphere-ocean dynamics. Academic press, London, 662pp.
- [6] Lange, P. and H. Hühnerfuss, 1978, "Drift response of monomolecular slicks to wave and wind action", J. Phys. Oceanogr., Vol. 8, 142-150.
- [7] Pedlosky, J., 1979. Geophysical fluid dynamics, Springer-Verlag, 624pp.