

沿岸域 渦動擴散: 觀測 및 프랙탈 擴散 모델링 Eddy Diffusion in Coastal Seas: Observation and Fractal Diffusion Modelling

이문진* · 강용균**
Moonjin Lee* and Yong Q. Kang**

要 旨 : 동일지점에 투하한 여러개 표류부표 사이의 이격거리 관측방법을 사용하여 한국 연안 여러곳에서 와동확산의 분산을 측정하고 '확산계수'를 산정하였다. 시간이 경과함에 따라 와동확산의 분산은 t^m 에 비례하여 증가하였는데, 여기서 시간지수승 m 은 1.5와 3.5 범위의 비정수 값으로 나타났다. 실측된 분산의 시간지수승 관계는 와동확산계수를 상수로 두는 확산모델링 방법에서는 재현되지 않는다. 본 논문에서는 프랙탈 이론을 도입하여 와동확산에 따른 분산의 지수승 관계를 시뮬레이션하였다. 본 논문의 프랙탈 확산모델에서는 가우시소음 대신에 프랙탈 가우시소음(fGn)을 와동확산에 따른 임의행보 과정에 적용하였다. 이 모델에서 프랙탈 브라운운동(fBm)으로 표현되는 와동확산의 분산은 시간 t 에 대하여 t^H 와 같이 나타났는데, 여기서 H 는 허스트 지수(Hurst exponent)이다. 본 논문의 프랙탈 확산모델은 시간지수승이 1과 2범위인 와동확산 분산을 잘 재현하였지만, 시간지수승이 2가 넘는 경우는 재현되지 않는다. 시간지수승이 2이상인 경우는 평균류의 유속전단(velocity shear)에 기인한다.

핵심용어 : 프랙탈, 와동확산, 허스트지수, 프랙탈 가우시소음, 프랙탈 브라운운동

Abstract □ We measured the variance of eddy diffusion and associated 'diffusion coefficients' in coastal regions of Korea by observing the separation distances among multiple drifters deployed simultaneously at the same initial position. The variance of eddy diffusion was found to be proportional to t^m , where t is the time and m is a non-integer scaling exponent between 1.5 and 3.5. The observed scaling exponent of eddy diffusion cannot be reproduced by diffusion models employing constant eddy diffusivity. In this study, we applied fractal theory in simulating exponential increase of variance of eddy diffusion. We employed the fGn(fractional Gaussian noise) as a 'modified' random walks corresponding to the oceanic eddy diffusion. The variance of eddy diffusion, which corresponds to the fBm(fractional Brown motion) of our diffusion model, is proportional to t^H , where H is Hurst scaling exponent. The temporal increase of the variance, with scaling exponent between 1 and 2, was successfully reproduced by our fractal diffusion model. However, our model cannot reproduce scaling exponent greater than 2. The scaling exponents greater than 2 are associated with the velocity shear of the mean flow.

Keywords : fractal, eddy diffusion, Hurst exponent, fractional Gaussian noise, fractional Brown motion

1. 서 론

연안역에서 오염물질의 확산은 조류, 해류, 취송류 등에 의한 수송과 난류적 확산에 의해 일어난다. 연안역 와동확산에 대한 정량적인 모델링은 해양환경 예측

에 있어서 중요하다. 기존의 해양확산 모델에서 평균류에 의한 수송은 해수유동모델의 결과를 이용하며, 난류적 확산은 상수인 와동확산계수를 도입한 이동확산방정식을 이용하여 산정한다. 와동확산계수를 상수로 취급하는 확산모델에서 난류적 확산의 분산은 시간

*한국기계연구원 선박해양공학연구소 (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 305-600, Korea)

**부경대학교 해양과대학 해양학과 (Department of Oceanography, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea)

에 대해 선형적으로 증가한다.

그러나 실제 해양에서 관측된 난류적 확산은 시간에 따라 지수적으로 증가하는 특성을 보인다. 미국 연안역에서의 염료확산실험 결과를 정리한 Okubo(1971)는 난류적 확산의 분산이 '평균적으로' 시간의 2.34승에 비례하여 증가한다고 보고한 바 있다. 해양확산에 있어서 시간의 지수승은 절대적인 값이 아니고 흐름양상에 따른 난류의 시공간적 규모나 상황에 따라 다르게 나타난다. 수심분 내지 수시간 규모에서 난류 확산을 관측한 Bodwen *et al.*(1974)은 난류 확산의 분산이 시간의 1.5~2.0승에 비례하여 증가한다고 제시하였다. 전반적으로 연안역에서보다 외해역에서 와동확산 분산의 지수승이 큰 경향을 보이는데, Pasmantier(1988)는 연안역에서 난류 확산의 지수승은 '1승' 부근의 값을 가지며 외해역에서 지수승은 '3승' 부근의 값을 갖는다고 보고한 바 있다.

난류적 확산의 특성은 한국 주변 연안역에서도 관측된 바 있다. 연속측류 결과를 이용하여 수초 내지 수분 규모의 난류 확산을 추정한 이(1991)의 연구에서 난류 확산의 분산은 시간의 1.7승에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 한국 주변 연안역에서도 시간의 지수승은 해역에 따라 다르게 나타났는데, 부표분산실험을 통하여 수분 내지 수십분 규모의 난류 확산을 관측한 Kang and Lee(1994)의 연구에서 시간 지수승은 1.25~1.99의 범위를 보였다. 이러한 난류 확산의 특성은 와동확산계수를 상수로 취급하는 기존 확산모델에서는 재현될 수 없다(이, 1996).

최근 해양의 난류를 이해하기 위한 새로운 접근 방법으로 프랙탈 이론을 이용하고 있다(Osborne *et al.*, 1986, 1989; Sanderson *et al.*, 1990; Kang and Lee, 1994). 프랙탈은 해양난류 뿐만 아니라 여러가지 자연현상에서 나타나고 있다(Mandelbrot, 1983). 해양난류에 대한 프랙탈 특성 연구를 통하여 난류의 시간 지수승은 프랙탈 차원으로 해석됨을 보이고 있으나, 프랙탈을 이용한 와동확산 재현 기법에 관한 연구는 아직까지 이루어지지 않고 있다.

본 논문의 제 2절에서는 우리나라 연안역에서 부표 확산 실험에 의해 관측된 와동확산 분산의 시간적 변동을 기술하고, 제 3절에서는 프랙탈을 이용한 라그랑쥬 방법에 의해 시간의 비정수(non integer) 지수승으로 증가하는 해양난류 확산을 모델링하는 기법을 제시하고, 제 4절에서는 본 연구에 적용된 프랙탈 확산모델의 성과에 대하여 고찰하고 있다.

2. 연안역 와동확산 관측

2.1 부표분산 실험

연안역 와동확산 특성을 조사하기 위하여 부표추적에 의한 분산 실험을 수행하였다. 부표분산 실험에서는 동일점에 투하된 3개 표류부표(drifters)의 경로를 추적함으로써 난류적 확산에 따른 부표간 이격거리의 분산을 조사하였다. 실험에 사용된 'X'형의 날개를 가진 표류부표는 수면하 1.5 m의 해수유동을 따라가도록 설계하였다. 표류부표의 위치는 DGPS(Differential Global Position System), Decca Trisponder 등의 장비를 이용하여 측정하였다. 본 연구에 사용한 DGPS는 두 대의 GPS 수신기를 사용한 오차보정방법을 이용하였는데, 이 방법에 의한 측위오차는 약 1m 정도이다(강과이, 1995). Decca Trisponder에 의한 표류부표 실험은 한국전력연구원의 장비지원과 협조로 수행되었다.

Fig. 1에 나타낸 한반도 서해의 3개 해역, 남해의 4개 해역, 동해의 4개 등 총 11개 해역에서 1993년부터 1996년까지 22회에 걸쳐 표류부표 확산실험을 수행하였다. 각 실험의 개요는 Table 1과 같다. 본 논문에서는 관측결과 중 서해 아산만과 남해 삼천포만(Fig. 2), 동해 고리외해역과 원성외해역(Fig. 3)의 부표 이동 경로를 그림으로 제시한다.

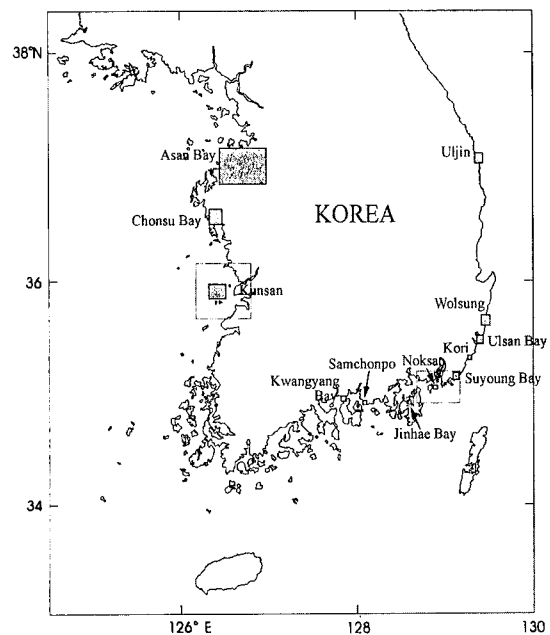


Fig. 1. Locations of experiment sites.

Table 1. Summary of drifter tracking experiments.

Experiment site	Date (Moon's age)	Tracking time	Equipment*
Asan Bay	Oct. 18, 1993 (2.7)	09:17-12:02	GPS
Off Youngkwang	May 16, 1995 (16.3)	10:36-11:05	DTS
	Oct. 26, 1995 (1.9)	13:37-14:21	DTS
Kwangyang Bay	Sep. 11, 1993 (24.5)	12:09-15:06	GPS
	Nov. 14, 1993 (0.2)	17:02-17:42	GPS
Off Samchonpo	Apr. 29, 1995 (28.9)	11:36-13:31	DGPS
	Nov. 20, 1995 (27.0)	13:09-15:04	DGPS
	Feb. 28, 1996 (9.2)	14:45-16:21	DGPS
Jinhae Bay	Oct. 2, 1993 (16.1)	10:40-14:04	GPS
	Mar. 27, 1995 (25.6)	13:02-15:02	DGPS
	Nov. 10, 1996 (28.5)	11:55-14:15	DGPS
Off Noksan	Jan. 26, 1995 (24.7)	13:50-15:12	DGPS
	Jan. 26, 1995 (24.7)	15:18-16:34	DGPS
Suyoung Bay	Jul. 20, 1996 (4.4)	15:13-16:50	DGPS
Off Kori	Aug. 17, 1994 (9.8)	12:27-14:48	DTS
	Jan. 17, 1995 (15.7)	12:35-14:25	DTS
Off Wolsung	Jul. 28, 1994 (19.3)	14:22-15:40	DTS
	Nov. 24, 1994 (20.6)	12:14-14:14	DTS
	May 11, 1995 (11.3)	11:26-12:57	DTS
Ulsan Bay	Nov. 11, 1995 (18.0)	08:40-11:04	DGPS
Off Uljin	Jul. 29, 1994 (20.3)	13:25-15:16	DTS
	Feb. 22, 1995 (22.2)	12:16-13:27	DTS

*DGPS=Differential GPS, DTS=Decca Trisponder System

2.2 시간에 따른 부표간 이격거리의 증가

시간에 따른 부표간 이격거리로부터 와동확산의 분산을 아래와 같이 산정하였다. 동일점에서 출발한 여러개 표류부표의 위치 $(x_i(t), y_i(t))$ 로부터 계산한 부표간 평균 이격거리의 제곱에 의한 난류 확산의 분산 $\sigma^2(t)$ 는

$$\sigma^2(t) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{i \neq j}^N [\{x_i(t) - x_j(t)\}^2 + \{y_i(t) - y_j(t)\}^2] \tag{1}$$

와 같다(Officer, 1976). 여기서 t 는 표류부표 투하후 경과한 시간이고, i 와 j 는 표류부표의 번호, N 은 표류부표의 총갯수이며, $x_i(t)$ 와 $y_i(t)$ 는 시간 t 때의 i 번째 부표 위치이다.

관측된 부표간 이격거리의 분산 $\sigma^2(t)$ 에 대하여 관계식

$$\sigma^2 = At^m \tag{2}$$

을 적용하여 시간에 대한 지수 관계를 조사하였다(Bowden, 1983). 여기서 상수 A 와 시간 지수승 m 은 최소자승법을 이용하여 결정하였다. 여기서 난류적 확산의 분

산(σ^2)의 단위는 m^2 이며, 시간의 단위는 분(min)이다. 서해 아산만과 남해 삼천포만에서 관측된 와동확산 분산의 시간 지수적 관계는 Fig. 4와 같으며, 동해의 고리 외해역과 월성외해역에서 관측된 와동확산 분산은 Fig. 5와 같다. 부표분산 실험결과로부터 분석된 와동확산 분산은 Table 2에 제시된 바와 같이 시간의 1.45승~3.46승에 비례하여 증가하였다. 본 연구에서 조사된 와동확산의 시간 지수승은 Kang and Lee(1994)의 결과인 1.25승~1.99승에 비해 보다 범위가 넓다. 이와 같이 와동확산의 시간 지수승이 균일하지 않은 것은 평균류 유속의 공간적 경사(gradient)가 와동확산 분산의 증가율에 영향을 주기 때문이다(이에 대한 연구결과 논문은 준비중임).

와동확산계수 K 는 확산분산 σ^2 의 시간적 변화율로

$$K = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2}{dt} \tag{3}$$

와 같이 정의되며, 여기에 $\sigma^2 = At^m$ 의 관계를 적용하면 와동확산계수는

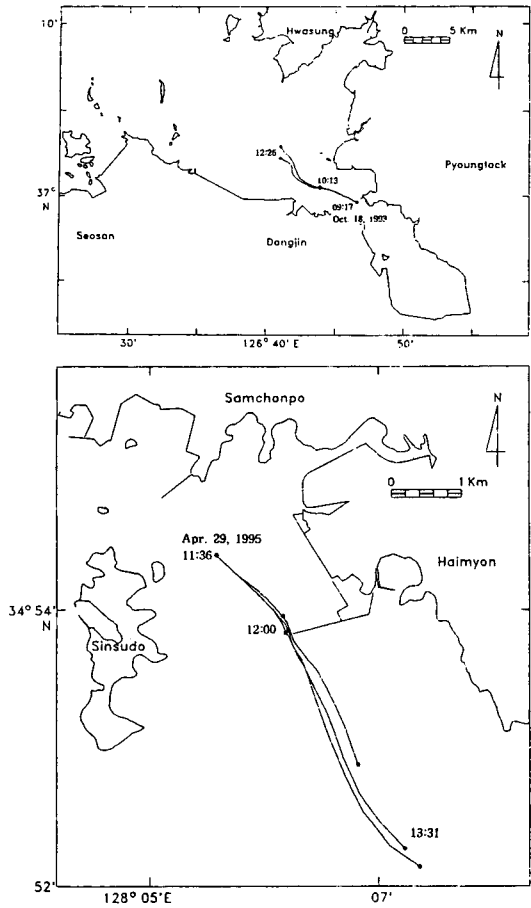


Fig. 2. Trajectories of 3 drifters in the Asan Bay (upper figure) and in the Samchonpo Bay (lower figure).

$$K = \frac{1}{2} A m t^{m-1} \quad (4)$$

또는

$$K = b \sigma^n \quad (5)$$

와 같이 표현된다. 여기서 b 는 상수이며 $n=(2m-1)/m$ 이다(Bowden *et al.*, 1974; Bowden, 1983). 와동확산의 분산으로부터 계산된 와동확산계수 K 는 Table 2에 나타난 바와 같이 시간에 일정한 상수가 아니라, 시간의 0.45승~2.46승에 비례하여 증가하였다.

3. 프랙탈 와동확산 모델

3.1 평균류에 의한 수송과 난류적 확산

해양에서 오염물은 평균류에 의해 수송되면서 난류적 확산에 의해 퍼져 나간다. 또한 생화학적 분해나 침강 등의 작용에 의해 농도가 변한다. 이러한 해양 확산의 과정은

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \dot{Q} \quad (6)$$

와 같은 이류, 확산, 발생(소멸)을 포함하는 상대방정식으로 표현된다. 여기서 u, v 는 각각 x, y 방향의 유속이고, c 는 오염물의 농도이며, \dot{Q} 는 오염물의 발생(소멸)을 나타낸다.

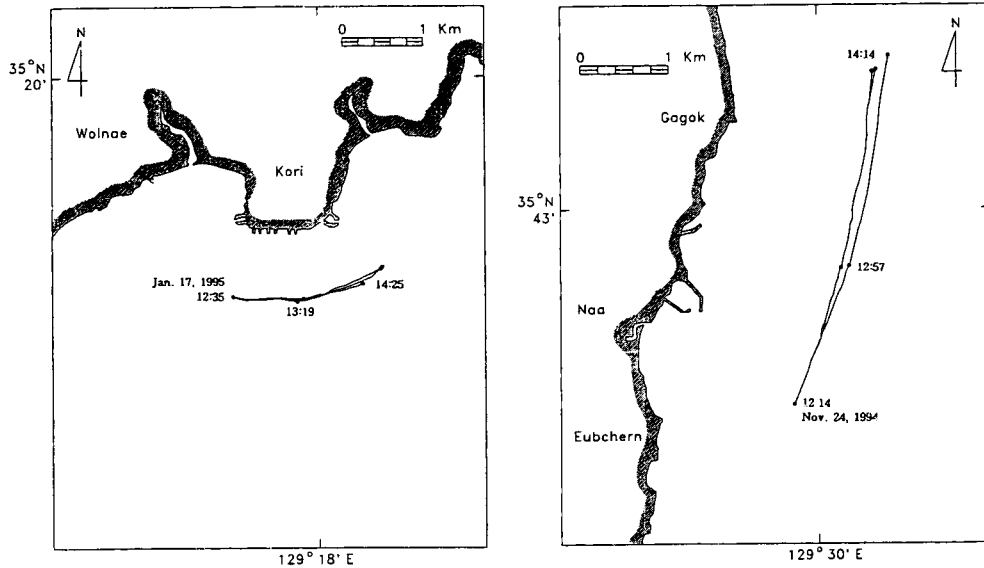


Fig. 3. Trajectories of 3 drifters off the coast of Kori (left figure) and off the coast of Wolsung (right figure).

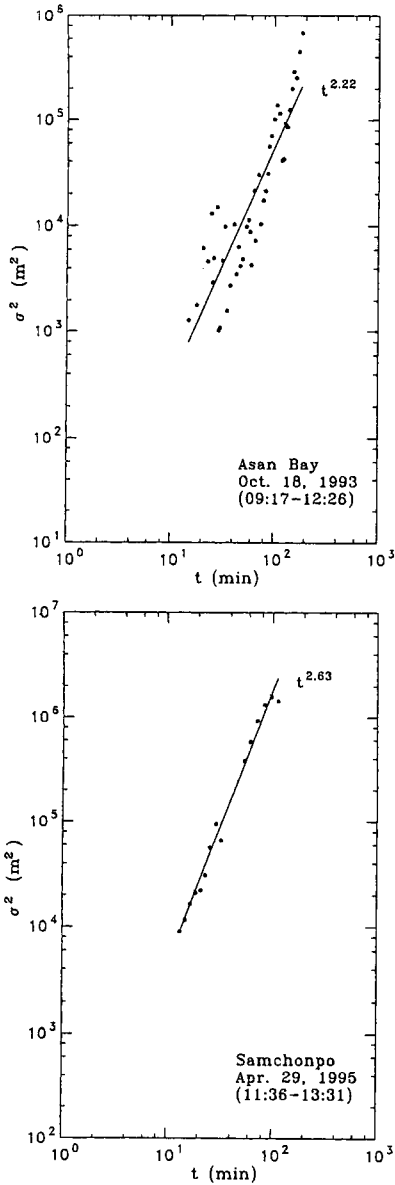


Fig. 4. Variograms of separation distances of 3 drifters in the Asan Bay and in the Samchonpo Bay.

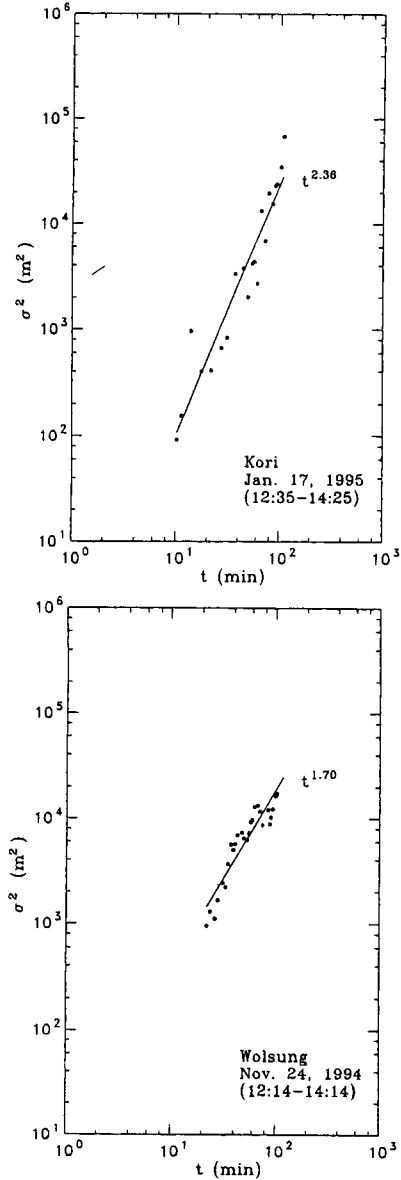


Fig. 5. Variograms of separation distances of 3 drifters off the coast of Kori and off the coast of Wolsung.

오염물의 상태방정식에 대한 라그랑쥐 모델링에서는 오염발생지에서 투하한 수치적 추적자(numerical tracers)가 평균류(\bar{u} , \bar{v})와 난류(u' , v')에 의해 이동하는 경로를 추적한 후 단위 체적 안에 분포하는 입자(수치적 추적자)의 갯수로부터 오염물의 농도 c 를 계산한다. 시간 t 때 위치(x_t, y_t)에 있던 입자가 시간이 δt 만큼 경과한 후에 놓이게 되는 새로운 위치($x_{t+\delta t}, y_{t+\delta t}$)은

$$x_{t+\delta t} = x_t + (\bar{u} + u') \delta t$$

$$y_{t+\delta t} = y_t + (\bar{v} + v') \delta t \tag{7}$$

로 주어진다.

해양에서 관측된 외동확산의 분산은 시간에 따라 선형비례하여 증가하지 않고, 비정수 차원의 지수배로 증가하는 특성을 보인다. 이러한 해양 외동확산의 특성은 외동확산계수를 상수로 취급하는 모델링 방법으로는 재현되지 않는다. 관측치와 부합되는 외동확산

Table 2. Variance (σ^2) of separation and eddy diffusivity (K) associated with separation distances of drifters (σ^2 in m^2 , K in m^2/sec).

Experiment site	Hours	Variance (σ^2)	Diffusivity (K)
Asan Bay	2.2 hrs	1.95 $t^{2.22}$	2.16 $t^{1.22}$
Off Youngkwang	1.3 hrs	0.004 $t^{3.27}$	0.007 $t^{2.27}$
	0.7 hrs	43.75 $t^{1.56}$	34.13 $t^{0.56}$
Kwangyang Bay	3.0 hrs	8.11 $t^{1.89}$	7.66 $t^{0.89}$
	0.7 hrs	20.32 $t^{2.08}$	21.13 $t^{1.08}$
Off Samchonpo	1.9 hrs	9.73 $t^{2.63}$	12.79 $t^{1.63}$
	1.9 hrs	0.05 $t^{2.72}$	0.07 $t^{1.72}$
	1.6 hrs	0.09 $t^{2.74}$	0.12 $t^{1.74}$
Jinhae Bay	3.6 hrs	0.17 $t^{2.05}$	0.17 $t^{1.05}$
	2.0 hrs	0.01 $t^{3.10}$	0.02 $t^{2.10}$
	2.3 hrs	0.004 $t^{3.46}$	0.007 $t^{2.46}$
Off Noksan	1.4 hrs	0.66 $t^{1.86}$	0.61 $t^{0.86}$
	1.3 hrs	0.18 $t^{2.46}$	0.22 $t^{1.46}$
Suyoung Bay	1.6 hrs	5.31 $t^{1.54}$	4.09 $t^{0.54}$
Off Kori	2.4 hrs	0.03 $t^{3.11}$	0.52 $t^{2.11}$
	1.8 hrs	0.44 $t^{2.36}$	0.52 $t^{1.36}$
Off Wolsung	1.3 hrs	48.42 $t^{1.48}$	35.83 $t^{0.48}$
	2.0 hrs	7.52 $t^{1.70}$	6.39 $t^{0.70}$
	1.5 hrs	0.02 $t^{3.17}$	0.03 $t^{2.17}$
Ulsan Bay	3.1 hrs	4.54 $t^{2.04}$	4.63 $t^{1.04}$
Off Uljin	1.9 hrs	0.08 $t^{2.74}$	0.11 $t^{1.74}$
	1.2 hrs	12.82 $t^{1.45}$	9.29 $t^{0.45}$

분산을 재현하기 위해서는 새로운 모델링 기법이 도입되어야 한다. 본 연구에서는 실제 해양에서 관측된 와동확산 분산의 시간 지수적 특성을 재현하기 위하여 와동확산계수 대신에 난류에 의한 확산거리 개념을 사용하고, 난류 확산거리의 시간지수적 특성을 갖도록 지정하였다. 난류 확산거리의 비정수차원 시간지수성은 프랙탈 브라운운동(fractal Brownian motion, fBm) 특성을 이용하여 재현하였다.

3.2 와동확산의 프랙탈 성질 및 모델링 방법

난류적 확산을 브라운운동(Brownian motion)으로 취급하는 몬테카를로(Monte Carlo) 방법에서 시간 t 때 위치 x_t 와 전단계의 위치 x_{t-1} 사이에는

$$x_t = x_{t-1} + \Delta x \quad (8)$$

의 관계가 있다. 여기서 Δx 는 δt 동안의 난류적 변위로서 양(+)과 음(-) 부호에 대해서 각각 50%의 확률의 정규분포(Gaussian distribution)를 가진다. 시간 t 때의 입

자 분산은

$$\langle x_t^2 \rangle = \langle x_{t-1}^2 \rangle + \Delta x^2 \quad (9)$$

와 같이 정의된다(Berg, 1983). 여기서 $\langle \dots \rangle$ 는 총 입자 갯수에 대한 평균을 의미하며, $\langle x_t^2 \rangle$ 와 $\langle x_{t-1}^2 \rangle$ 은 시간 t 와 $t-1$ 때의 총 입자 위치의 분산이고, Δx^2 은 각 단계별 변위의 분산으로서 시간에는 무관하다. 초기 입자의 위치가 모두 '0'일 때, 시간에 따른 입자의 분산은

$$\langle x_1^2 \rangle = 1\Delta x^2, \langle x_2^2 \rangle = 2\Delta x^2, \dots, \langle x_t^2 \rangle = t\Delta x^2 \quad (10)$$

와 같이 시간 t 가 경과함에 따라 선형적으로 증가한다. 브라운운동에 의한 확산의 분산으로부터 확산계수는

$$D = \frac{\langle x_t^2 \rangle}{2t} \quad (11)$$

와 같이 결정되므로(Officer, 1976; Berg, 1983), 이의 값은 항상 $0.5\Delta x^2$ 로 시간에 무관한 상수값으로 나타난다.

시간의 비정수 지수승에 비례하여 증가하는 해양의 난류적 확산을 재현하기 위해서는 입자 변위의 분산이

$$\langle x_t^2 \rangle = \Delta x^2 t^m \quad (12)$$

와 같이 주어져야 한다. 여기서 t 는 시간이며, m 은 시간의 지수승을 나타내는 상수이다. 이 경우 와동확산계수 D_t 는

$$D_t = \frac{\Delta x^2}{2t} t^m = \frac{\Delta x^2}{2} t^{m-1} \quad (13)$$

와 같이 시간 t 에 따라 지수적으로 증가한다. 브라운운동은 위의 식에서 시간의 지수승 m 의 값이 1인 특수한 경우에 해당된다.

분산이 시간 t 에 대해 비정수차원의 지수승으로 증가하는 프랙탈브라운운동 fBm에서 시간에 따른 입자의 위치는

$$x_t = x_{t-1} \pm \Delta x_H \quad (14)$$

와 같이 주어진다(Mandelbrot and van Ness, 1968). 여기서 Δx_H 는 δt 동안의 변위를 나타내는 프랙탈가우스 소음(fractional Gaussian noise, fGn)이다. 브라운운동에서 단계별 위치는 무작위적으로 결정되나, fBm에서는 전단계에 대해 지속성(persistency) 또는 반지속성(anti-persistency)을 갖도록 지정할 수 있다. 프랙탈가우스소음 fGn의 분산 Δx_H^2 은

$$\Delta x_H^2 \propto t^{2H} \quad (15)$$

와 같이 시간의 지수승에 비례하여 증가하는 특성을 갖는다(Voss, 1985, 1988; Saupe, 1988). 여기서 H 는 허스트 지수(Hurst exponent)로서 입자 거동의 지속성 정도를 나타낸다. 허스트 지수 H 가 0.5이면 fBm은 전통적인 브라운운동이며, 이 경우 입자의 변위는 전단계 변위와 아무런 상관성이 없다. 허스트 지수가 0.5~1인 경우 fBm의 변위는 전단계 변위와 양의 상관관계를 가지는 '지속성'의 변동을 한다. 한편 허스트 지수가 0~0.5인 경우 fBm의 변위는 전단계의 변위와 음의 상관관계를 가지는 '반지속성'의 변동을 한다(Mandelbrot and van Ness, 1968; Mandelbrot and Wallis, 1969). fBm에서 입자 변위의 분산 Δx_H^2 는

$$\Delta x_H^2 = \Delta x^2 t^{2H} \quad (16)$$

와 같이 브라운운동에 의한 변위의 분산 Δx^2 에 시간 지수적 특성 t^{2H} 이 곱해진 형태로 나타난다. fBm에서 확산계수 D_H 는

$$D_H = \frac{\Delta x^2}{2t} t^{2H} = D t^{2H-1} \quad (17)$$

와 같이 시간의 지수승에 비례하는 것으로 주어진다(Gefen *et al.*, 1983; Feder, 1988).

비정수 차원의 분산특성을 보이는 와동확산을 fBm을 이용하여 모델링하는 방법은 다음과 같다. 시간 δt 동안 입자변위($\delta x, \delta y$)는

$$\begin{aligned} \delta x &= \bar{u} \delta t + u' \delta t = \bar{u} \delta t + s_x \\ \delta y &= \bar{v} \delta t + v' \delta t = \bar{v} \delta t + s_y \end{aligned} \quad (18)$$

와 같이 평균류에 의한 변위($\bar{u}\delta t, \bar{v}\delta t$)와 난류에 의한 변위(s_x, s_y)로 주어지며, 난류에 의한 변위(s_x, s_y)는

$$Var(s_x) \propto t^m, Var(s_y) \propto t^m \quad (19)$$

와 같이 시간 t 의 m 승에 비례하는 분산특성을 가진다.

실제 해양의 난류 확산 관측결과에서 방사상(radial) 분산(σ^2)은

$$\sigma^2 = A t^m \quad (20)$$

와 같은 특성을 갖는 것으로 제시되었다. 그런데 방사상 분산 σ^2 은 x 방향 분산 σ_x^2 및 y 방향 분산 σ_y^2 과

$$\sigma^2 = 2\sqrt{\sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2} \quad (21)$$

의 관계에 있으며 등방성(isotropic) 확산의 경우, 난류 확산의 x 축상 및 y 축상 분산은

$$\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = 0.5 A t^m \quad (22)$$

와 같이 표현된다(Bowden, 1983). 본 연구의 확산모델에서는 난류 확산의 분산특성을 충족시키기 위하여 x 축상 및 y 축상 난류적 확산거리를

$$s_x = \lambda F_t, s_y = \lambda G_t \quad (23)$$

와 같이 지정하였다. 여기서 λ 는 $\sqrt{0.5A}$ 의 값을 갖는 상수이며, F_t 와 G_t 는 분산이 시간 t 의 $m(=2H)$ 승에 비례하는 fGn이다. fBm은 중앙변위(mid-point displacements) 방법으로 만들었으며(Saupe, 1988), fGn은 fBm의 차시계열(difference time series)에 의해 만들었다.

3.3 프랙탈 와동확산 모델링 실험

fBm을 이용하여 난류 확산의 분산이 $\sigma^2 \propto t^m$ 와 같이 되는 모의실험을 수행하였다. 시간 지수승 m 은 0.5, 1, 0, 1.5의 3가지 경우를 고려하였다. 모델 계산에서는 유속경사에 의한 효과를 배제하기 위하여 평균류에 의한 입자의 수송은 없는 것으로 가정하였으며(평균류가 0인 경우는 균일류의 경우와 확산특성이 동일함), 난류적 확산은

$$s_x = F_t, s_y = G_t \quad (24)$$

와 같이 fGn에 의한 난류적 확산거리(s_x, s_y)로서 지정하였다. 여기서 F_t 와 G_t 는 각각 분산이 t^{2H} 에 비례하도록 하였으며, 실험에 사용된 허스트지수 H 는 0.25, 0.5, 0.75이다. 3가지 경우의 모델링 실험에서 동일지점에 투하된 20개의 입자의 변위를 매 1초마다 추적하여 이격거리에 의한 난류적 분산을 계산하였으며, 입자 투하후 10초, 100초, 1000초 및 10000초 후의 입자가 흩어진 상태를 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림에 나타난 바와 같이 허스트지수에 따른 부표분산의 면적은 시간이 경과함에 따라 더욱 커진다. Fig. 7에는 시간증가에 따른 입자간 이격거리 분산을 지수 스케일로 나타냈다.

fBm 모델을 이용하여 삼천포 해역에서 연속측류를 통하여 관측된 난류적 확산의 분산관계(이, 1991)

$$\sigma^2 = A t^m = 0.01 t^{1.7} \quad (25)$$

를 재현한 결과는 아래와 같다. 방사상 분산 σ^2 으로부

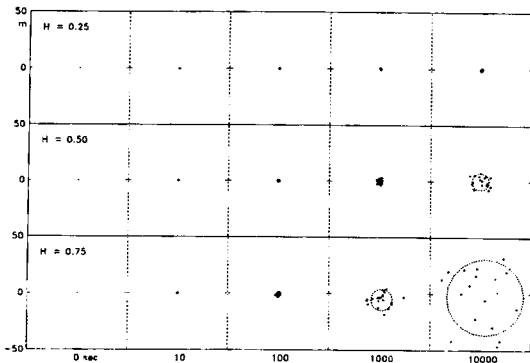


Fig. 6. Spreadings of 20 drifters simulated by fBm model with Hurst exponents 0.25, 0.50 and 0.75.

터 x 축상 분산 σ_x^2 과 y 축상 분산 σ_y^2 은

$$\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = 0.5At^m = 0.005t^{1.7} \quad (26)$$

와 같이 결정되므로, 관측된 난류적 확산의 분산을 재현하기 위하여 난류적 확산거리는

$$\begin{aligned} s_x &= \sqrt{0.5A} F_t = 0.071 F_t \\ s_y &= \sqrt{0.5A} G_t = 0.071 G_t \end{aligned} \quad (27)$$

와 같이 지정하였다. 여기서 F_t 와 G_t 는 분산이 시간의 1.7승에 비례하는 fGn이다. 확산은 투하한 500개 입자에 대하여 매 1초마다 위치를 추적하여 계산하였다. 총 1000초 동안 계산된 결과중 10초, 100초, 1000초의 3단계 확산분포는 Fig. 8과 같다. 이 그림의 가장 상부에 제시된 빗금 친 원은 관측된 확산의 분산을 나타내

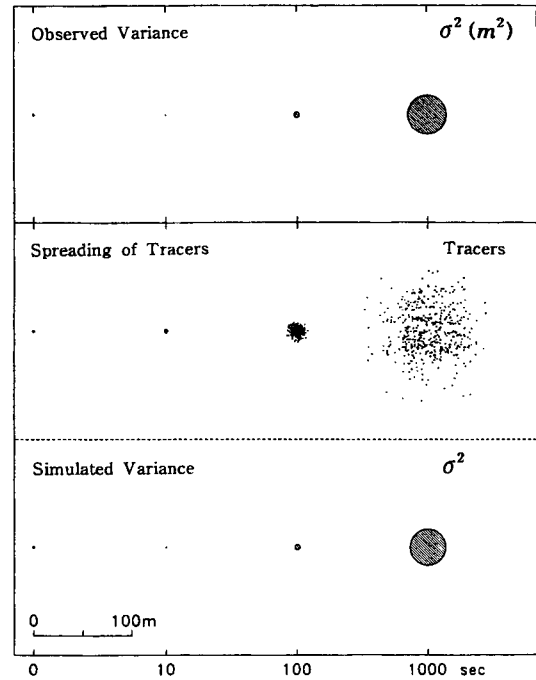


Fig. 8. Observed variance of eddy diffusion in Samchonpo Bay (top figure), the spreading of 500 drifters simulated by fBm model (middle figure), and the variance of 500 drifters of the simulation (bottom figure).

며, 아래의 점분포와 빗금친 원은 각각 재현된 입자 확산과 분산을 나타낸다. 이 그림에서 나타난 바와 같이 fBm 모델의 결과는 관측된 확산의 분산을 거의 완벽하게 재현하였다.

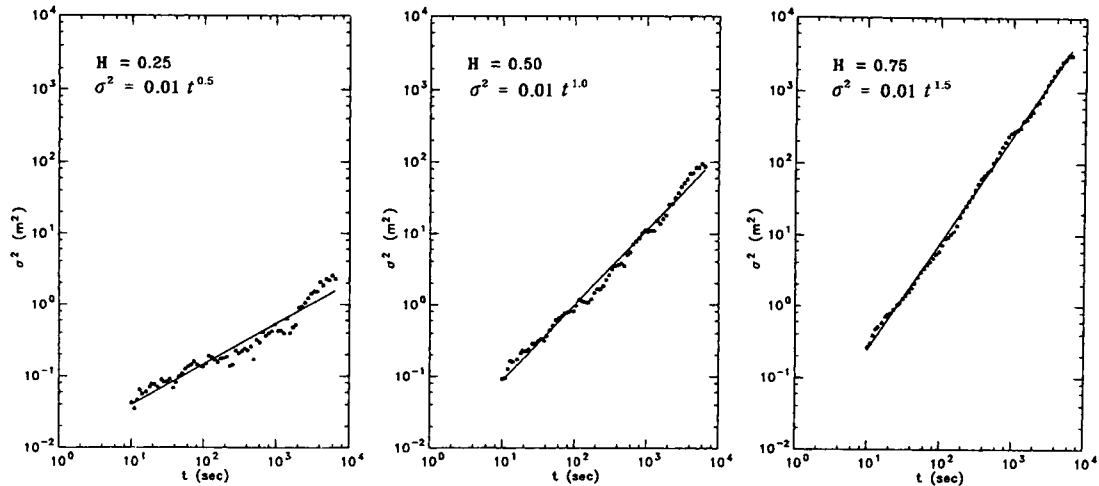


Fig. 7. Variograms of separation distances of 20 drifters simulated by fBm model with Hurst exponents 0.25, 0.50 and 0.75.

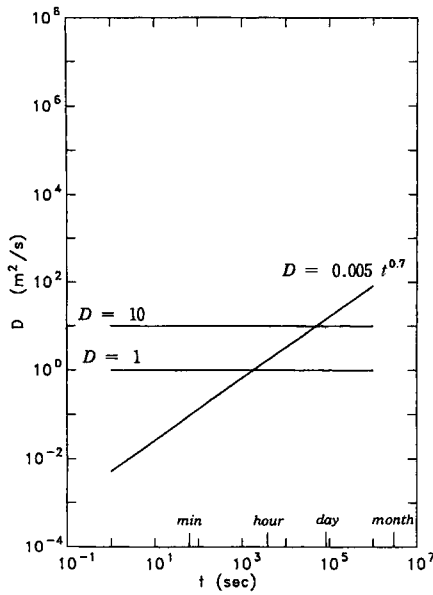


Fig. 9. A comparison between time-dependent eddy diffusivity $D=0.005 t^{0.7}$ and time-independent constant eddy diffusivities $D=1$ and $D=10 \text{ m}^2/\text{sec}$.

fBm 모델에 적용한 난류 확산 분산으로부터 산정한 와동 확산계수 D 는

$$D = 0.005 t^{0.7} \tag{28}$$

와 같이 시간의 0.7승에 비례하여 증가한다. 시간에 따라 지수적으로 증가하는 와동 확산계수는 시간규모에 따라 확산규모의 증가율이 달라짐을 의미한다. 시간 지수적 와동 확산계수와 시간에 일정한 와동 확산계수간의 관계는 Fig. 9와 같다. 시간 지수적 와동 확산계수는 약 30분의 시간규모에서 $1 \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 값을 가지며, 약 14시간의 시간규모에서는 $10 \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 값을 갖는다. 즉 30분 이내의 짧은 작은 시간규모에서 fBm 모델의 확산 결과는 와동 확산계수가 $1 \text{ m}^2/\text{sec}$ 인 경우보다 작게 나타나지만, 시간규모가 14시간 이후에는 와동 확산계수가 $10 \text{ m}^2/\text{sec}$ 인 경우보다 더 크게 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 연안역에서 동시에 투하한 여러개 부표 실험을 통하여 와동 확산을 관측하였으며, 이의 재현을 위한 모델링 기법을 연구하였다. 한반도 연안에서 총 22회에 걸친 실험결과 난류적 확산은 분산이 시

간의 지수승에 비례하여 증가하는 특성을 보였으며, 시간의 지수승은 1.45~3.46의 값을 보였다.

와동 확산계수를 상수로 지정한 경우 와동 확산은 시간의 1승에 비례하여 증가한다. 본 연구에서는 해양에서 관측된 난류 확산의 특성을 재현하기 위하여 프랙탈 브라운운동 fBm을 이용하였다. fBm은 통상적인 브라운운동과 달리 분산이 시간 t 에 따라 t^H 으로 증가하는 특성을 보인다. fBm에 의한 와동 확산 모델링 결과 분산의 시간지수승이 2 이하인 경우 관측된 난류 확산은 본 논문의 프랙탈 확산모델을 통하여 잘 재현되었다. 프랙탈 확산모델을 이용하여 삼천포에서 실측된 난류 확산의 분산 $\sigma^2=0.0107 t^{1.7}$ 을 재현한 결과, 프랙탈 확산모델은 관측된 분산과 동일한 확산 특성을 재현하였다.

프랙탈 확산모델에서 난류 확산의 분산은 시간에 따라 지수승으로 증가하므로 배출 초기에는 확산영역이 작지만, 시간이 경과함에 따라 확산영역이 지수적으로 증가하는 특성을 보인다. 통상적인 브라운 확산모델과 비교할 때, 프랙탈 확산모델은 오염물의 감쇠특성에 따라 큰 차이를 보인다. 프랙탈 확산모델에서의 확산계수는 시간에 따라 지수적으로 증가하므로 방출 초기에는 브라운운동 확산계수에 비하여 크지 않지만, 시간이 경과함에 따라 프랙탈 확산계수는 브라운운동 확산계수보다 커진다(Fig. 9). 따라서 분해속도가 빨라서 방출후 단기간 내에 소멸되는 오염물 확산을 프랙탈 방법으로 모델링하면 기존의 확산모델에서 나타난 결과보다 작거나 비슷한 확산분포를 보인다. 그러나 체류시간이 긴 오염물의 확산에 있어서는 프랙탈 확산모델의 확산 범위가 더 크게 나타난다. 본 연구의 프랙탈 확산모델은 난류적 확산의 시간지수승을 재현함으로써 실제 해양의 확산현상을 보다 현실성있게 반영하고 있다.

본 논문에서 제시한 fBm 확산모델링 방법은 난류적 분산이 시간에 대하여 선형적으로 증가하는 경우 뿐만 아니라 시간에 대하여 1 내지 2승까지 증가하는 경우에도 효율적으로 적용된다. 해양에서 부표분산 실험에 의해 실측된 난류적 분산은 시간에 대하여 2승 이상의 지수승으로 증가하는 경우도 있는데, 이 경우에는 본 논문의 fBm 방법으로 재현이 불가능하다. 시간지수승의 값이 2 이상인 와동 확산은 '평균류'(mean flow)의 유속전단(velocity shear)에 수반되어 일어난다(이에 대한 연구 논문은 준비중에 있다).

사 사

본 연구는 1996년도 교육비 학술조성 연구비(과제번호 KIOS-96-M-01)에 의하여 연구되었다. Decca Trisponder를 사용한 연안역 부표분산 실험에 지원과 협조를 해준 한국전력연구원에 사의를 표한다.

참고문헌

- 강용균, 이문진, 1995. 두대의 GPS 수신기를 이용한 DGPS 정밀측위. 한국지형공간정보학회지, **3**: 15-28.
- 이문진, 1991. 연안역 확산 수치모델에 적합한 외확산계수의 추정. 부산수산대학교 이학석사 학위논문, 49 pp.
- 이문진, 1996. 프랙탈을 이용한 해양 확산모델 연구. 부경대학교 이학박사 학위논문, 141 pp.
- Berg, H.C., 1983. *Random Walks in Biology*. Princeton Univ. Press, 142 pp.
- Bowden, K.F., 1983. *Physical Oceanography of Coastal Waters*. John Wiley & Sons, 302 pp.
- Bowden, K.F., Krauel, D.P. and Lewis, R.E., 1974. Some features of turbulent diffusion from a continuous source at sea. In: *Turbulent Diffusion in Environmental Pollution edited by F.N. Frenkiel and R.E. Munn*, Academic Press, pp. 315-329.
- Feder, J., 1988. *Fractals*. Plenum, 283 pp.
- Gefen, Y., Aharony, A. and Alexander, S.S., 1983. Anomalous diffusion on percolating clusters. *Phys. Rev. Lett.*, **50**: 77-80.
- Hinze, J.O. 1975. *Turbulence*. McGraw-Hill, 790 pp.
- Kang, Y.Q. and Lee, M.-J., 1994. Fractals in the spreading of drifters: Observation and simulation. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **29**: 392-401.
- Mandelbrot, B.B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Co., 468 pp.
- Mandelbrot, B.B. and Wallis, J.R., 1969. Computer experiments with fractional Gaussian noises. *Water Resources Research*, **5**: 228-267.
- Mandelbrot, B.B. and van Ness, J.W., 1968. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review*, **10**: 422-437.
- Officer, C.B., 1976. *Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters)*. John Wiley & Sons. 465 pp.
- Okubo, A., 1971. Oceanic diffusion diagram. *Deep Sea Res.*, **18**: 789-802.
- Osborne, A.R., Kirwan, A.D. Jr., Provenzale, A. and Bergamasco, L., 1986. A search for chaotic behaviour in large and mesoscale motions in the Pacific Ocean. *Physica*, **23D**: 75-83.
- Osborne, A.R., Kirwan, A.D. Jr., Provenzale, A. and Bergamasco, L., 1989. Fractal drifter trajectories in the Kurshio Extension. *Tellus*, **41A**: 416-435.
- Pasmanster, R.A., 1988. Deterministic diffusion, effective shear and patchiness in shallow tidal flows. In: *Physical Process in Estuaries edited by J. Dronkers and W. van Leussen*, Springer-Verlag, pp. 42-52.
- Sanderson, B.G., Goulding, A. and Okubo, A., 1990. The fractal dimension of relative Lagrangian motion. *Tellus*, **42A**: 550-556.
- Saupe, D., 1988. Algorithms for random fractals. In: *The Science of Fractal Images edited by H.-O. Peitgen and D. Saupe*, Springer-Verlag, pp. 71-136.
- Voss, R.F., 1985. Random fractal forgeries. In: *Fundamental Algorithms for Computer Graphics, NATO ASI Series edited by R.A. Earnshaw*, Vol. **F17**, Springer-Verlag, pp. 805-835.
- Voss, R.F., 1988. Fractals in nature: From characterization to simulation. In: *The Science of Fractal Images edited by H.-O. Peitgen and D. Saupe*, Springer-Verlag, pp. 21-70.