

해양투기물질의 확산 특성에 관한 연구

홍도웅 · 류청로
부경대학교 해양공학과

A Study on Characteristic of Diffusion of the Ocean Dumping Material

DO-UNG HONG, CHEONG-RO RYU

Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

KEY WORDS: ocean dumping 해양투기, diffusion 확산, vertical turbulent diffusivity 연직난류확산계수, horizontal turbulent diffusivity 수평난류확산계수, settling velocity 침강속도

ABSTRACT: In order to regulate the physical characteristics of an ocean dumping material in the south-eastern East Sea, the diffusion characteristics with the observation, hydraulic experiment and numerical experiment data are investigated.

The main results are as follows:

- (1) Spying CTD observation result of the area of Jung in the East Sea, the ocean dumping area had influenced the Tsushima warm current of high temperature and salinity. Horizontal turbulent diffusivity is $1.913 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ by drogue tracking.
- (2) From the experiment of settling, the initial settling velocity of each material is 1.0~2.7 cm/sec according to the specific gravity and initial concentration. In the pycnocline, particles didn't settle under the pycnocline any more and accumulated. It is signified that calculation of the sedimentation rate of the ocean dumping material including of vertical diffusion must be regard the pycnocline in the ocean area have well-developed pycnocline.
- (3) Vertical turbulent diffusivity were $2.219 \times 10^{-8} \sim 8.874 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ from the experiment of settling. And, the pycnocline influenced the vertical turbulent diffusivity.
- (4) From the result of diffusion simulation in the East Sea, the co-concentration line of 0.05 ppm and 0.1 ppm are limited at dumping area after 200 days. The constant concentration line of 0.01 ppm is distributed to the vicinity of Ulleungdo and Tokdo, but isn't distributed to the coastal area of East Sea and southern area of Jung in the East Sea.

1. 서 론

폐기물의 해양투기는 국가의 국토이용 전략 중의 하나로써 구미각국을 포함한 선진국들은 해양을 폐기물처리의 최종 처분장소로 오래전부터 이용하여 왔다. 국제적으로 1970년대 이전까지는 폐기물의 해양투기가 해양환경에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 인식되어 왔으나, 1970년을 전후로 폐기물의 해양투기가 해양환경에 영향을 줄 수 있다는 점에 주목하여 해양투기를 규제하기 위한 국제적 분위기가 조성되었다. 우리나라는 1988년부터 지정 배출 해역을 선정하여 폐기물의 해양투기를 허용하여 왔으며, 서해와 동해의 지정해역에 배출된 폐기물의 양은 1988년 552,000톤에서 1999년 6,444,000톤으로 약 12배정도 증가하였다.

폐기물의 최종처분은 국가 경제·산업·환경 분야의 국가

정책 중 하나이며 해양은 폐기물을 최종 처분할 수 있는 환경 중의 하나이다. 그러나, 폐기물의 최종 처분에는 환경과 인간에 대한 위해를 방지하기 위한 모니터링이 반드시 수반되어 관리되어야 한다. 해양투기에 대한 구체적인 규제의 강화속에 해양환경 관리의 최적화를 위한 연구의 필요성이 강조되고 있다.

본 연구는 해양투기물질의 확산 특성을 해역의 수괴 및 유동 특성과 관련지어 규명하고, 해양투기가 해양환경에 미치는 영향을 해역특성을 고려하여 검토하고자 한 것이다. 물질 확산 특성을 파악하는데 있어 중요한 인자인 수평난류확산계수와 연직난류확산계수는 현장관측과 실험을 통하여 산정하고, 이들 확산계수를 수치모델에 적용하여 동해 해양투기물질의 확산에 대한 수치실험을 실시하고, 이들 결과로부터 해양투기물질의 확산 특성과 물리적 영향범위의 검토과정을 정리하고자 한 것이다.

2. 동해 투기장 해역의 물리적 특성

동해 투기장 해역은 동해로 유입되는 대마난류수의 분기지역에 해당하며 계절적인 변동이 큰 대마난류와 북한한류의 영향으로 인해 복잡한 수온, 염분 구조를 갖고 있다. 본 연구에서는 투기물 배출 해역인 병·정해역을 중심으로 CTD 조사를 통한 수온과 염분자료를 이용하여 이곳의 물리적인 해황 특성을 알아보았다. Fig. 1은 조사정점을 나타낸 것이다.

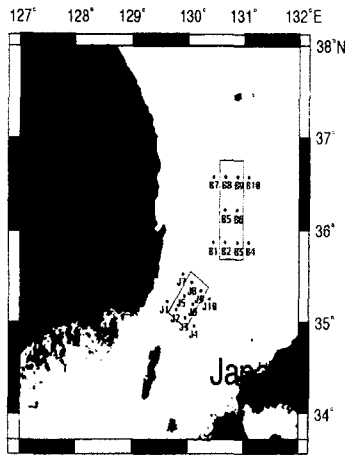


Fig. 1. Station maps of CTD observation adjacent to the dumping area in the East Sea

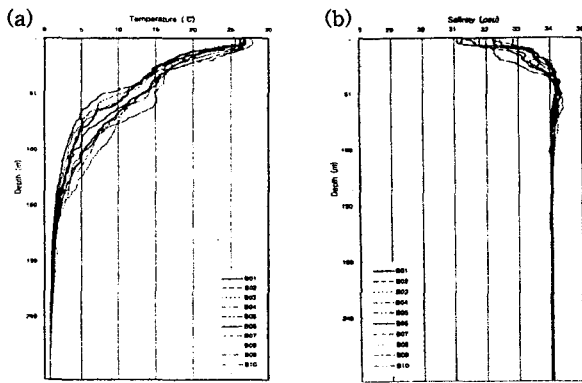


Fig. 2. Temperature and salinity at the area of Byung, the East Sea (Aug., 2000).

Fig. 2~Fig.5는 8월과 11월에 병해역과 정해역의 연직 수온 분포도와 연직 염분분포도이다. 관측결과 병해역의 경우 11월의 수심 150 m부근에서, 수온은 정점에 따라 최대 7.3 °C에서 최소 1.8 °C로 8월의 1.5~2.8 °C보다 오히려 높게 나타나고 있다. 수온약층의 경우 관측정점에 따라 차이를 보이며, 8월에는 표층에 나타나고 있으나, 11월에는 더 깊은 수심인 23~60 m에서 나타나고 있다. 또한, 11월에는 제 2의 수온약층이 관측정점에 따라 수심 100 m이하에서 보이기도 한다. 염분의 경우 심해에서는 8월과 11월 모두 34.0 psu정도로 일정하게 나타나고 있다. 그러나, 표층에서의 최소 염분이 8월에는 31.2 psu인 것에 비해 11월에는 33.7 psu로 높게 나타나고 있다. 염분약층

은 8월은 표층부근에서 보이며, 11월에는 더 깊은 수심인 29~52 m에서 관측정점에 따라 다르게 나타나고 있다. 각 정점에서의 8월과 11월의 관측결과는 많은 차이를 보이고 있으며, 수온약층과 염분약층이 8월의 결과와 비교해서 11월에 더 깊은 수심에서 나타나고 있다. 이는 계절적인 영향을 비롯해서, 관측 당일의 기상에 의한 영향 때문으로 생각된다. 또한, 이 지역에 대마난류수가 미치는 영향도 무시할 수 없을 것이다.

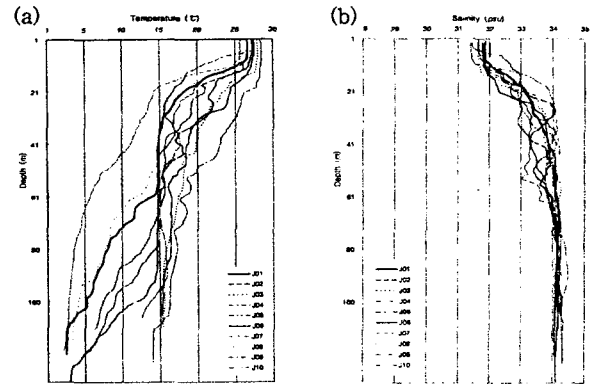


Fig. 3. Temperature and salinity at the area of Jung, the East Sea (Aug., 2000).

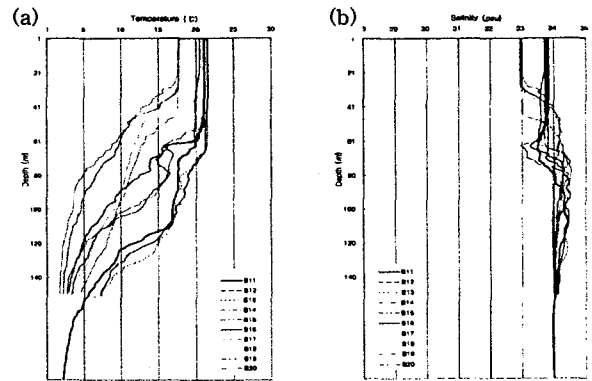


Fig. 4. Temperature and salinity at the area of Byung, the East Sea (Nov., 2000).

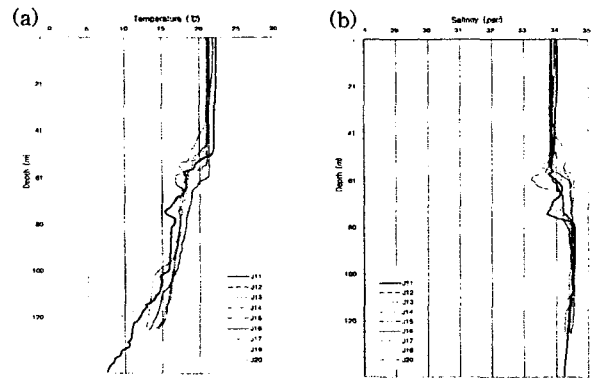


Fig. 5. Temperature and salinity at the area of Jung, the East Sea (Nov., 2000).

정해역의 관측결과를 보면, 120 m 수심의 경우 8월의 경우 정점에 따라 4~16 ℃로 나타나고 있으나, 11월의 경우 9~14.5 ℃로 나타나고 있다. 수온약층의 경우에도 관측정점에 따라 차이를 보이며, 11월에 8월보다 더 깊은 수심인 37~60 m 부근에서 나타나고 있다. 염분의 경우, 표층에서 8월은 32.0 psu정도이지만 11월은 이 보다 높게 나타나고 있다. 그리고 11월의 경우에는 관측정점에 따른 염분의 변화가 8월에 비해 그렇게 크게 나타나지 않고 있다. 11월에 염분약층의 경우는 수심 45 m 부근에 나타나는데, 이는 8월의 관측결과와 비교해서 대략 40 m 정도 낮아진 것이다. 그러나, 수심 80 m보다 깊은 곳에서의 염분은 8월과 11월 모두 34.0 psu 정도로 거의 일정하게 나타나고 있다.

동해 병·정 해역의 수평난류확산계수를 구하기 위하여 Drogue 관측을 행하였다. 2000년 9월 18일 동해 정해역에서 오후 2시 10분에 N 35° 07.163', E 129° 48.559' 부근에 10개의 Drogue를 투입하였고, 익일 오후 6시 6분에 N 35° 07.164', E 129° 55.475' 부근에서 모두 회수하였다. 10개의 Drogue를 회수한 위치는 거의 일치하였다. 3시간 56분 동안에 Drogue가 이동한 거리를 계산하면 10.41 km이다. 이를 Okubo(1971)가 제안한 식에 대입할 경우 수평난류확산계수는 $1.91276 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 이다.

$$K_r = \frac{\sigma_{rc}^2}{4t} \quad (1)$$

여기에서 얻어진 수평난류확산계수를 확산에 관한 수치실험에 적용하고자 한다.

3. 해양투기를 침강실험

3.1 실험방법

입자의 침강속도를 구할 경우 일반적으로 침강수조(원통수조)를 사용한다. 그러나, 침강실험은 시간경과에 따른 부유농도를 구하기 위하여 부유물을 채취하므로, 그 후의 부유농도는 채수량의 영향을 받아 초기농도가 변할 우려가 있고, 또한, 수심방향으로 부유농도차가 생기지 않도록 하는 것이 중요하기 때문에 채수량은 가능한 적게 하여야 한다.

본 실험에서는 Photo 1과 같은 외경 300 mm, 높이 6,490 mm의 원통수조에 연직방향 300 mm 간격으로 20개의 채수공을 설치하여 실험을 행하였다.



Photo 1. Experimental set-up.

수조 내에 물을 6,000 mm까지 채우고, 여러 종류의 시료를 수조에 넣은 후 시간이 흐름에 따라 그 연직확산 정도를 파악하였다. 정확한 측정을 위해 수조에 300 mm 간격으로 설치되어 있는 채수공으로 수조내의 물을 채수하여 탁도계인 DRT 1000으로 물의 탁도를 측정하였다. 측정시간은 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240분이다. 그리고 시료에 따라 그 이상의 시간 간격으로 측정을 행하였다.

탁도는 물의 탁한 정도를 표시하는 것으로 여러 가지 부유물질에 의하여 생겨나고 그 크기범위는 콜로이드 분산질로부터 굵은 분산질에 이르며 난류도에 따라 달라진다.

탁도 측정방법은 기기분석법과 육안법이 있는데, 본 수리실험에 사용되어진 기기분석법은 혼탁입자들에 의하여 산란도를 측정하는 네펠로법(Nephelometry)을 이용하는 것으로 네펠로법-혼탁도-단위(Nephelometry Turbidity Unit ; NTU)를 사용한다. 또한, 육안법은 혼탁도에 의하여 빛의 통과가 방해받는 정도를 측정하는 방법으로 잭슨-혼탁도-단위(Jackson Turbidity Unit ; JTU)를 사용한다. 한편, 실험에서 얻어진 탁도의 정도는 농도 단위 (g/l)로 환산하였다.

실험은 우선 약층이 없는 상태의 담수에서 행하였고, 염분차를 이용해서 밀도약층을 만든 후에 같은 재료로 실험을 행하여 그 결과를 비교하였다. Table 1은 각 실험 Case의 조건을 나타낸 것이다.

Table 1. Conditions of experiment

| | Material | Moisture ratio (%) | Initial concentration (g/l) | Density stratification |
|----------|----------|--------------------|-----------------------------|------------------------|
| Case I | Clay | 18.750 | 5.2 | × |
| Case II | Silt | 40.171 | 7.1 | × |
| Case III | Mud | 57.143 | 10 | × |
| Case IV | Mud | 57.143 | 10 | ○ |

3.2 실험결과

실험은 동해 투기장에서의 투기물질의 침강속도와 연직난류확산계수를 산정하기 위해 수행되었다. 실험 Case I~IV까지 각기 다른 시료와 조건을 적용하였는데, Photo 2는 Case IV의 초기확산 장면을 나타낸 사진이다. 그리고 밀도약층이 없는 담수에서 시간에 따른 부유농도 분포를 나타낸 것이 Fig. 6의 (a)이며, 밀도약층이 있는 상태에서 시간에 따른 부유농도 분포를 나타낸 것이 Fig. 6의 (b)이다. Fig. 7은 각 시료의 초기 침강속도 변화를 나타낸 것이다.

Case I~Case III의 결과를 보면 초기시간 50분까지의 연직 부유 농도분포의 경사는 급경사를, 50분 이후부터는 완만한 경사를 보이고 있다. 전체적인 경향은 처음에 수심이 낮은 곳에서는 고농도의 분포를 보이고, 깊은 곳에서는 부유농도가 작다가, 시간이 경과하면서 모든 수심에서 부유농도가 거의 같아지는 경향을 보인다. 그리고 더 많은 시간이 경과하면 오히려 수심이 낮은 곳에서는 부유농도가 작아지고, 깊은 곳에서는 부유농도가 커지다가 결국엔 거의 모든 입자가 퇴적을 하고 아주 미세한 입자만 부유해서, 모든 수심에서 일정한 부유농도를 나타낸다. 전체적으로 농도가 시간이 지날수록 처음에 비해 작아지는데, 이는 퇴적으로 인한 영향과 함께 채수로 인해 수조내

의 물과 부유물질이 점점 줄어드는 영향 때문에 판단된다.

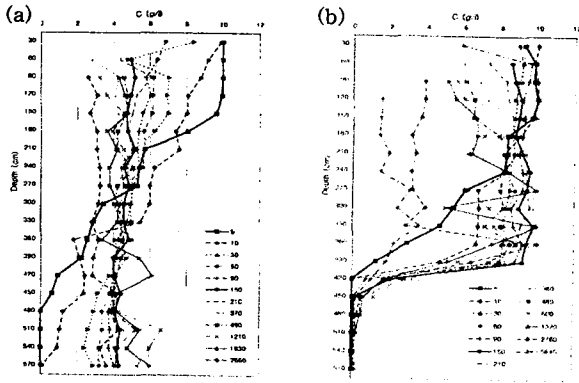


Fig. 6. Temporal variation of vertical distribution of SS concentration (a) Case III, (b) Case IV.

Fig. 6의 (b)에서 밀도약층이 있는 부분에서 미세한 입자의 mud가 더 이상 침강하지 못하고 있는 것을 볼 수 있다. Photo 2에서도 다른 Case들과는 달리 밀도약층 부분에서 더 이상 침강하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

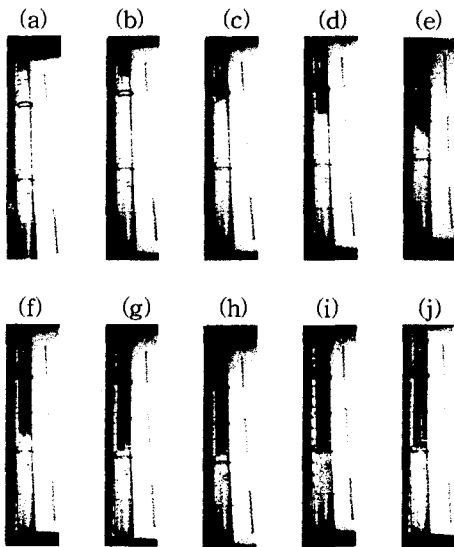


Photo 2. Experimental Photos of Case IV ((a) : after 35 sec, (b) : after 60 sec, (c) : after 100 sec, (d) : after 120 sec, (e) : after 180 sec, (f) : after 220 sec, (g) after 250 sec, (h) : after 310 sec, (i) : after 430 sec, (j) : after 580 sec).

각 물질별 초기침강속도를 나타낸 Fig. 6을 보면 물질의 비중과 초기농도 등으로 인해 속도가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Case I의 침강속도는 1.5~1.8 cm/sec로 다른 물질에 비해 그 시간경과에 따른 변동의 폭이 좁다고 할 수 있다. Case II의 침강속도는 시간경과에 따라 1.3~2.7 cm/sec이고, Case III은 1.0~2.2 cm/sec이다. 밀도약층이 있는 Case IV의 경우 초기 침강속도는 1.1~2.6 cm/sec이다.

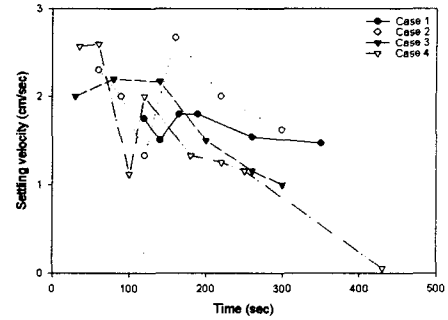


Fig. 7. Temporal variation of settling velocity by material type.

모든 Case에서 150 sec가 경과한 후에 부유농도가 낮아짐에 따라 침강속도가 점차적으로 작아지는데, 이는 본 실험에 사용된 물질의 입자가 혼합된 것이기에 시간이 경과하면서 굵은 입자는 빨리 침강해서 가라앉고, 미세한 입자만이 서서히 침강되기 때문에 판단된다. 그리고 밀도약층이 있는 Case IV의 경우에는 침강속도가 거의 0에 가깝게 나타나서 약층 아래로 물질이 더 이상 침강되지 않음을 보여주고 있다. 따라서, 밀도약층은 연직확산 특성에 많은 영향을 미칠 것으로 생각된다.

3.3 연직난류확산계수 산정

와동확산을 구하는 방법으로 매체가 있는 유체의 미소부분이 불규칙으로 운동하거나 확산물질이 이동하는 현상, 다시 말하면 협의의 확산에 의한 농도분포를 국부적인 이류의 성과로 보는 이론이 있다. 즉 특정유체분자의 이동거리는 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

Table 2. Vertical turbulent diffusivity from result of experiment

| Case Depth (cm) | Vertical turbulent diffusivity (cm^2/sec) | | | |
|--------------------|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Case I | Case II | Case III | Case IV |
| 30 | 1.85601×10^{-4} | 8.87416×10^{-4} | 2.56503×10^{-4} | 1.43111×10^{-4} |
| 50 | 7.03844×10^{-5} | 1.44158×10^{-5} | 1.20817×10^{-4} | 2.80170×10^{-5} |
| 60 | 6.08307×10^{-5} | 5.45924×10^{-5} | 7.43593×10^{-5} | 1.46917×10^{-5} |
| 90 | 5.08701×10^{-5} | 3.79001×10^{-5} | 6.61751×10^{-5} | 1.07763×10^{-5} |
| 120 | 3.46667×10^{-5} | 2.86838×10^{-5} | 6.97579×10^{-5} | 2.08619×10^{-5} |
| 150 | 3.70141×10^{-5} | 2.52666×10^{-5} | 4.59426×10^{-5} | 7.38881×10^{-6} |
| 180 | 2.90670×10^{-5} | 7.36266×10^{-6} | 2.63021×10^{-5} | 6.81069×10^{-6} |
| 210 | 2.14661×10^{-5} | 5.16150×10^{-6} | 1.10387×10^{-5} | 8.20184×10^{-6} |
| 240 | 1.29561×10^{-5} | 3.88253×10^{-6} | 6.23619×10^{-6} | 3.28451×10^{-5} |
| 270 | 1.13967×10^{-5} | 3.65235×10^{-6} | 1.46086×10^{-5} | 4.23132×10^{-5} |
| 300 | 9.08941×10^{-5} | 3.92614×10^{-6} | 1.21224×10^{-5} | 5.79521×10^{-5} |
| 330 | 1.09175×10^{-5} | 3.05661×10^{-6} | 2.64970×10^{-5} | 9.86049×10^{-5} |
| 360 | 7.95820×10^{-6} | 4.95558×10^{-6} | 1.80032×10^{-5} | 1.65532×10^{-4} |
| 390 | 2.01306×10^{-5} | 4.97824×10^{-6} | 3.15662×10^{-5} | 6.63529×10^{-5} |
| 420 | 3.56726×10^{-5} | 5.31545×10^{-6} | 3.72982×10^{-5} | 1.93557×10^{-6} |
| 450 | 1.08945×10^{-5} | 5.49142×10^{-6} | 5.73219×10^{-5} | 2.93721×10^{-7} |
| 480 | 1.14703×10^{-5} | 5.63044×10^{-6} | 6.39359×10^{-5} | 2.49671×10^{-7} |
| 510 | 1.29180×10^{-5} | 5.25501×10^{-6} | 7.01423×10^{-5} | 3.98586×10^{-8} |
| 570 | 1.48929×10^{-5} | 5.65161×10^{-6} | 7.24826×10^{-5} | 2.21893×10^{-8} |

$$Y = \int_0^t u(\tau) d\tau \quad (2)$$

여기에서 $u(\tau)$ 는 시각 τ 에서의 속도이다. 농도가 동일한 미소유체부분의 분자가 와동에 의해서 이동해 갈 때, 유체분자의 평균 2층 거리 \bar{Y}^2 은 와동에 의한 농도분포의 분산 σ^2 과 같다고 생각할 수 있다. 따라서, 농도분산 σ^2 과 확산계수 K 의 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$K = \sigma^2 / 2t \quad (3)$$

식(3)에 침강실험에서 얻어진 결과를 적용하여 각 Case별, 수심별 연직난류확산계수를 구한 것이 Table 2이다. 연직난류 확산계수는 각 물질과 수심에 따라 차이를 보이고 있으며, $2.219 \times 10^{-8} \sim 8.874 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 나타났다. Case IV의 결과를 보면 밀도약층 아래의 연직난류확산계수가 $2.219 \times 10^{-8} \sim 2.937 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 가장 작게 나타내는데, 이는 연직난류 확산계수에 밀도약층이 영향을 미치기 때문이다.

4. 해양투기를 확산 수치모델링

4.1 기본방정식

물질 중에는 염분과 같이 보존성 물질이 있는가 하면, 대부분 유기물·무기물에서 볼 수 있듯이 이류·확산의 과정 중에 물질 자체가 분해 또는 합성되어 증감하는 비보존성인 것도 있다. 수치실험을 통하여 물질의 확산을 예측할 경우에는 보존성 물질로 가정해서 계산하는 경우가 많으나 대부분의 해수 중 환경인자가 비보존성 물질의 성질을 가지고 있는 점을 고려하면 실제 현상을 정확히 재현할 수 있다고 보기는 어렵다. 그러나 물질의 분해 및 합성 등의 복잡한 기구를 제외하면 보존성 물질로 가정해서 물질의 이류·확산을 예측하는 것이 가장 일반적인 방법이라 할 수 있다. 이러한 이유로 해역의 수질 예측에는 보존성 물질의 확산이 빈번하게 이용되고 있다. 본 연구에서 주 대상으로 하는 해안 부유토사(SS)는 침강과 재부상의 복잡한 기구를 가지고 이류·확산될 것으로 생각되나 분해·합성 등의 기구에 의한 변성은 적을 것으로 가정하여 부유토사 확산의 기본량을 추정하기 위한 모델로서 후술하는 보존성 물질의 확산모델을 사용한다. 보존성 물질의 단위체적당 농도를 c 라 하면, 평균유속장(u, v, w)에서의 확산방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(v c)}{\partial y} + \frac{\partial(w c)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial c}{\partial z}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 D_x, D_y, D_z 는 각각 x, y, z 방향의 난류확산계수이다. 식 (1)에 대해 해면과 해저를 통해 물질이 이류·확산되지 않는다는 조건을 사용하여 $z(-h \leq z \leq \zeta)$ 에 관해 적분하면 다음과 같은 2차원 확산방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial[(\zeta+h)c]}{\partial t} + \frac{\partial[(\zeta+h)uc]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta+h)vc]}{\partial y}$$

$$= \frac{\partial[(\zeta+h)K_x \frac{\partial c}{\partial x}]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta+h)K_y \frac{\partial c}{\partial y}]}{\partial y} \quad (5)$$

여기서 u, v, c 는 각각 $-h \leq z \leq \zeta$ 구간에서 수심방향으로 평균한 x, y 방향의 유속성분과 물질농도를 나타내고, K_x 와 K_y 는 수평류의 연직분포에 의한 이류성분을 포함한 가시확산계수를 의미한다. 농도 c 를 수위점과 동일위치에서 계산하고, 확산계수 K_x, K_y 를 유속 u, v 의 위치에서 정의해 주면 유동에 대한 계산식에서와 같은 방법으로 식 (1)에 대해서는 ADI법으로 다음과 같은 순환식이 전반의 시간 step $(n+1/2)\Delta t$ 에 대해 얻어진다.

$$c_{i,j}^{n+1/2} = -E_{i+1,j} c_{i+1}^{n+1/2} + F_{i+1,j} \quad (6)$$

여기서 $-E_{i+1,j}, F_{i+1,j}$ 는 시간레벨 $n\Delta t$ 이하에서 결정되는 기지량이다. 후반의 시간간격 $(n+1)\Delta t$ 에 대해서도 같은 일 반식을 얻을 수 있다.

4.2 해양투기를 확산 계산결과

동해 병·정 해역내 투기물질의 확산에 의한 영향범위를 파악하기 위해 동해 병·정 해역의 1998년 5월의 월투기량을 kg/hr 단위로 환산하여 병해역의 중심지역에서 $255,451 \text{ kg/hr}$ 을, 정해역의 중심지역에서 $173,364 \text{ kg/hr}$ 을 동시에 투기하는 것으로 가정해서 계산을 수행하였다. Drogue 관측결과로부터 구해진 수평난류확산계수는 $1.913 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 였으므로, 이 수평난류확산계수를 수치 모델에 적용하였다.

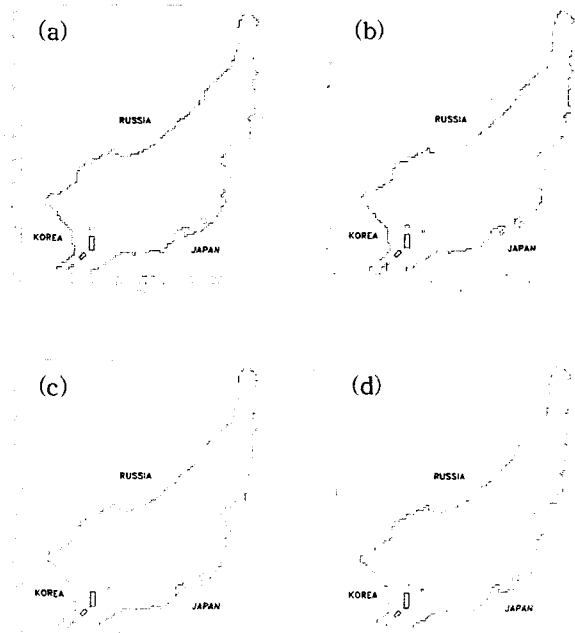


Fig. 8. Spatial distribution of SS concentration

확산계산 결과를 도시한 것이 Fig. 8이다. (a)는 주변 해역에서의 투기물질의 농도가 평형을 이루는 것으로 간주되는 20조석(10일 후)의 계산결과를 도시한 것이고, 다음으로 100조석(50일 후), 200조석(100일 후) 및 300조석(150일 후)의 결과를 각각 (b)~(d)에 도시하였다. 그림에서의 가중치 등농도

선은 0.01 ppm, 0.05 ppm 및 0.1 ppm을 나타내고 있다.

(a)는 10일 후의 계산결과를 나타낸 것으로, 0.01 ppm의 가중치 등농도선은 정해역 주변과 병해역 투기지역에서 북동쪽으로 약간 벗어난 해역에 분포하고 있으며, 0.05 ppm의 가중치 등농도선은 정해역에 한정되어 나타난다. 50일 후에는 정해역의 투기지역을 중심으로 0.01 ppm의 가중치 등농도선은 북동쪽으로 점차 넓게 퍼져가고 있으며, 0.05 ppm 및 0.1 ppm의 가중치 등농도선은 25일 후의 결과와 비교해 큰 변화는 보이고 있지 않다. 병해역에서는 투기지역을 중심으로 0.01 ppm의 가중치 등농도선은 동쪽으로 치우쳐 퍼지고 있다. 100일 후 정해역에서는 투기지역을 중심으로 한 0.01 ppm의 가중치 등농도선은 병해역까지 확산되어 분포하며, 0.05 ppm 및 0.1 ppm의 가중치 등농도선도 조금씩 그 범위가 넓어지고 있다. 병해역의 투기지역을 중심으로 한 0.01 ppm의 가중치 등농도선은 북동쪽으로 그 영향범위가 넓어지고 있으며, 병해역에서도 0.05ppm의 가중치 등농도선이 투기지역에서 약간 동쪽으로 벗어나서 나타나고 있다. 150일 후의 결과인 (d)를 보면, 병·정 해역 투기지역을 중심으로 0.01 ppm의 가중치 등농도선은 점차적으로 그 영향범위가 넓어지고 있으며, 0.05 ppm 및 0.1 ppm의 가중치 등농도선은 100일 후의 결과와 비교해 그다지 큰 차이를 볼 수 없다.

5. 결 론

해양투기물질의 확산 특성을 중심으로 한 해양투기물질의 거동 특성을 현장 관측자료, 수리실험, 및 수치실험을 통하여 검토하고, 환경영향을 고려한 적정투기량의 기본지침 마련을 위한 물리적 특성을 파악·정리하고자 하였다.

이를 위해 투기물질의 조성과 배출현황을 파악하고, 현장관측과 침강실험을 통하여 수평난류확산계수와 연직난류확산계수를 각각 산정하였다. 그리고 산정한 확산계수를 통해 투기장해역의 확산에 관한 수치실험에 적용하여 해역 특성을 고려한 해양투기물질의 확산 특성을 고찰하였다.

이상의 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 동해 정해역의 CTD 관측결과를 보면, 동해 투기장 해역은 고온·고염의 대마난류수의 영향을 받는 것으로 사료된다. Drogue 관측으로 구한 동해 투기장 해역의 수평난류확산계수는 $1.913 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 였다.
- (2) 침강실험의 결과, 초기침강속도는 물질의 비중과 초기농도에 따라 1.0~2.7 cm/sec로 다른 값을 나타냈다. 그리고 밀도약층에서는 더 이상 침강이 일어나지 않고 물질의 축적되는 것을 볼 수 있었다. 이는 밀도약층이 발달한 해역에서의 투기물질 연직확산을 고려한 침강을 계산시에 반드시 이러한 특징을 고려해야 한다는 것을 의미한다.
- (3) 침강실험 결과로부터 산정된 연직난류확산계수는 물질의 종류와 수심에 따라 커다란 차이를 나타냈으며, $2.219 \times 10^{-8} \sim 8.874 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 였다. 또한, 밀도약층은 연직난류확산계수에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (4) 동해를 대상으로 한 투기물질의 확산에 관한 수치실험 결

과, 0.05 ppm을 초과하는 가중치 등농도선은 200일이 지난 후에도 투기장 해역에 한정됨을 볼 수 있었다. 그리고 0.01 ppm의 가중치 등농도선은 시간경과와 함께 점차 북동쪽으로 넓게 퍼져 울릉도와 독도 부근까지 분포하지만, 한국동안과 정해역 남쪽해역에는 분포하지 않았다.

이 확산영역은 투기물질의 양에 따라 해역의 흐름과 확산 특성과 평형을 이루는 조건에서 안정된 상태로 분포할 것이나, 그 한계를 찾아내야 할 것이다. 그리고 투기물질의 생·화학적 작용에 의한 시간감소 효과에 의한 확산영역의 감소에 대한 평가와 해역 환경용량의 검토에 따라 적정 투기량의 추정을 위한 기본 과정이 정리되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 홍도웅(2001). "해양투기물질의 확산 특성에 관한 연구", 부경대학교 대학원 석사학위논문.
- 김차겸, 이종섭(1991). "실트질 점토의 침강 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 11(3): 85~93.
- 노부호(1993). "우리나라의 폐기물 해양배출제도와 국제동향", 한국해양학회지, 28(2): 137~141.
- 박용철, 최중기(1993). "폐기물 해양배출에 대한 해양환경적 고찰", 한국해양학회지, 28: 142~152.
- 신동수, 배기성(1998). "점착성 퇴적물의 침강특성에 관한 연구", 한국해양공학학회지, 12(2): 111~120.
- 한국해양연구소(1998). "해양환경 감시 및 평가기술 (해양투기장 해역의 환경 모니터링 기술)", 3차년도 최종보고서, 53~171.
- 황규남(2000). "새만금 갯벌퇴적물의 침강속도 산정을 위한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 20(2-B): 277~286.
- Okubo, A., and C.C. Ebbesmeyer(1976). "Determination of velocity, divergence and deformation rates from analysis of drogoue observations", Deep Sea Res., 23: 349~352.
- Seung, Y.H. and K.H. Cho(1998). "A note the outflow boundary conditions in modelling the East Sea circulation", J. Oceanog. Soc. Korea, 33(4): 212~218.
- Yoon, J.H.(1982). "Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part I. Formation of the East Korean Warm Current", J. Oceanog. Soc. Japan, 38: 43~51.
- Yoon, J.H.(1982). "Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part II. Influence of seasonal variations in atmospheric conditions on the Tsushima Current", J. Oceanog. Soc. Japan, 38: 81~94.
- Yoon, J.H.(1982). "Numerical experiment on the circulation in the Japan Sea, Part III. Mechanism of the nearshore branch of the Tsushima Current", J. Oceanog. Soc. Japan, 38: 125~130.
- 失野雄幸, 佐藤弘三(1978). "擴散方程式入門, 公業研究對策センター, 50~55.