한국해양공학회지 제16권 제1호, pp 16~21, 2002 (ISSN 1225-0767)

동해 남동해역 해양투기물질의 확산 특성

홍도웅* · 김종규* · 류청로*
*부경대학교 해양공학과

Diffusion Characteristics of Ocean Dumping Material in the Southeastern Coastal Waters of Korea

DO-UNG HONG*, JONG-KYU KIM* AND CHEONG-RO RYU*
*Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Ocean Dumping Material 해양투기물질, Diffusion 확산, Turbulent Diffusivity 난류확산계수, Settling Velocity 침강속도

ABSTRACT: *The diffusion characteristics of an ocean dumping material in the south-eastern East/Japan Sea related to regulate the physical characteristics with the observation and the hydraulic experiment are investigated. The main results are as follows :*

(1) Spying CTD observation result of the area of Jung in the East/Japan Sea, the ocean dumping area had influenced the Tsushima Warm Current of high temperature and salinity. Horizontal turbulent diffusivity is 1.913×10^{7} cm^2/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 2.219×10^{-8}~8.874×10^{-4} cm^2/sec from the experiment of settling. And, the pycnocline influenced the vertical turbulent diffusivity.

1. 서 론

폐기물의 해양투기는 국가의 국토이용 전략 중의 하나로서 구미 각국을 비롯한 선진국들은 해양을 폐기물처리의 최종 처리장소로 오래 전부터 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 배출해역을 선정하여 폐기물의 해양투기를 허용하여 왔으며, 서해와 동해의 지정해역에 배출된 폐기물의 양은 1988년 552,000톤에서 1999년 6,444,000톤으로 약 12배 정도로 증가하고 있다(한국해양연구원, 1998).

폐기물의 최종처분은 국가 경제 · 산업 · 환경 분야의 국가정책 중 하나이며 해양은 폐기물을 최종 처리할 수 있는 환경 중의 하나이다. 그러나, 폐기물의 최종 처리에는 환경과 인간에 대한 위해를 방지하기 위한 모니터링이 반드시 수반되어 관리되어야 한다. 해양투기에 대한 구체적인 규제의 강화속에 해양환경 관리의 최적화를 위한 연구의 필요성이 강조되고 있다.

제1저자 홍도웅 연락처: 부산시 남구 대연3동 599-1 부경대학교
051-620-6222 doung@hanmail.net

본 연구에서는 동해 남동해역 해양투기물질의 확산 특성을 해역의 수괴 및 유동 특성과 관련지어 규명하고, 해양투기가 해양환경에 미치는 영향을 검토하고자 하였다. 물질의 확산 특성을 파악하는데 있어 중요한 인자인 수평난류확산계수와 연직난류확산계수는 현장관측과 수리실험을 통하여 산정하고, 이들 결과로부터 해양투기물질의 확산 특성과 물리적 영향범위의 검토과정을 정리하고자 하였다.

2. 동해 해양투기장 해역의 물리적 특성

동해 남동해역 해양투기장 해역은 동해로 유입되는 쓰시마난류수의 분기지역에 해당하며 계절적인 변동이 큰 쓰시마난류와 북한한류의 영향으로 인해 복잡한 수온 및 염분 구조를 가지고 있다. 본 연구에서는 투기물의 배출 해역인 동해 병 · 정 해역을 중심으로 Fig. 1과 같은 조사정점에서 CTD 관측을 통한 수온과 염분자료를 이용하여 대상해역의 물리적인 해황 특성을 살펴보았다.

Fig. 2~Fig. 5는 8월과 11월의 병해역 및 정해역의 연직수온분포도와 연직염분분포도를 나타낸다. 관측결과 11월의 병해역의 경우 수심 150 m 부근에서, 수온은 정점에 따라 최대 7.3 ℃에서 최소 1.8 ℃로, 8월의 1.5~2.8 ℃보다 오히려 높게 나타나고 있다. 수온약층은 8월에는 표층에서 나타나고 있으나, 11월에는 더 깊은 수심인 23~60 m에서 나타나 관측정점에 따

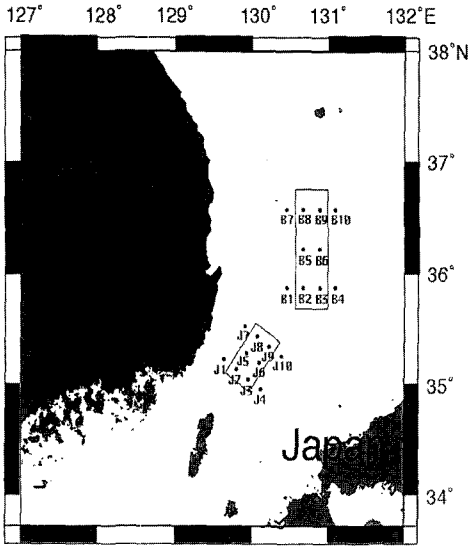

Fig. 1 Station maps of CTD observation adjacent to the dumping area in the East/Japan Sea.

라 차이를 보이고 있다. 또한, 11월에는 제 2의 수온약층이 수심 100 *m* 이하에서 관측정점에 따라 나타나기도 한다. 염분의 경우 심해에서는 8월과 11월 모두 34.0 *psu*정도로 일정하게 나타나고 있다. 그러나, 표층에서의 최소염분이 8월에는 31.2 *psu* 인 것에 비해 11월에는 33.7 *psu*로 높게 나타나고 있다. 염분약층은 8월은 표층부근에서 나타나며, 11월에는 더 깊은 수심인 29~52 *m*에서 관측정점에 따라 다르게 나타나고 있다. 8월과 11월의 관측결과는 각 정점에서 많은 차이를 보이고 있으며, 수온약층과 염분약층은 8월에 비하여 11월에 더 깊은 수심에서 나타나고 있다. 이는 계절적인 영향을 비롯해서, 관측 당일의 기상에 의한 영향 및 쓰시마난류수의 영향 때문인 것으로 사료된다.

정해역의 관측결과를 살펴보면, 수온은 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, 11월에는 8월보다 더 깊은 수심인 37~60 *m*부근에서 나타나고 있다. 염분의 경우, 표층에서 8월은 32.0 *psu* 정도이지만 11월은 이 보다 더 높게 나타나고 있다. 그리고 11월의 경우에는 관측정점에 따른 염분의 변화가 8

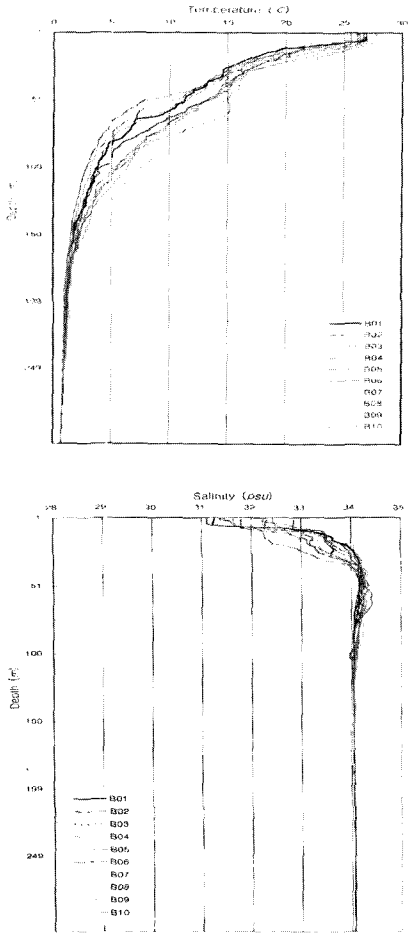

Fig. 2 Temperature (upper) and salinity (lower) at the area of Byung, the East/Japan Sea (Aug., 2000).

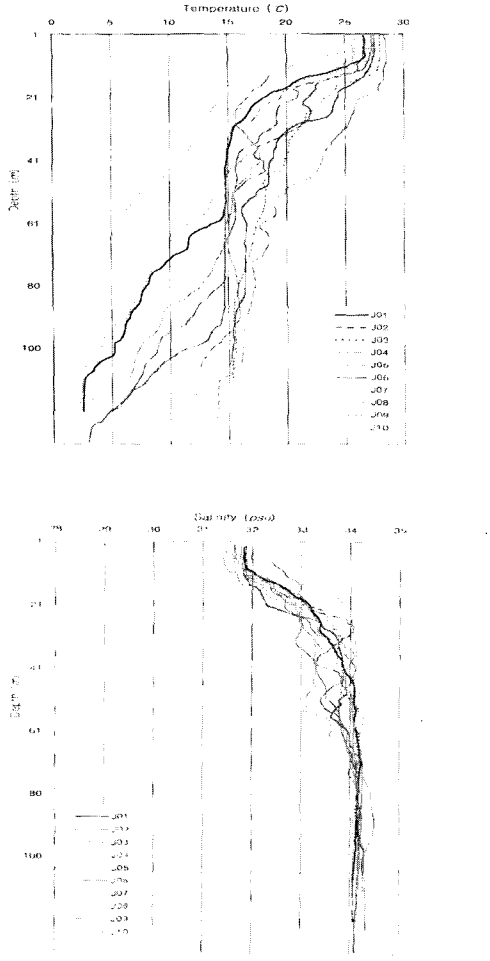

Fig. 3 Temperature (upper) and salinity (lower) at the area of Jung, the East/Japan Sea (Aug., 2000).

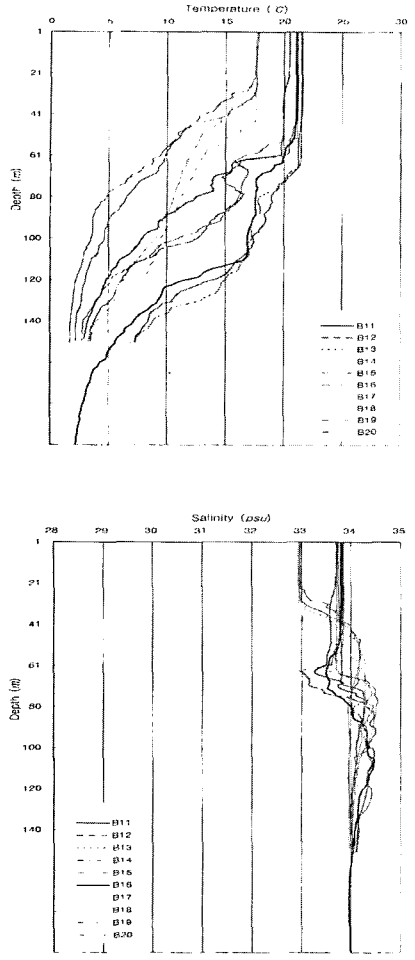

Fig. 4 Temperature (upper) and salinity (lower) at the area of Byung, the East/Japan Sea (Nov., 2000).

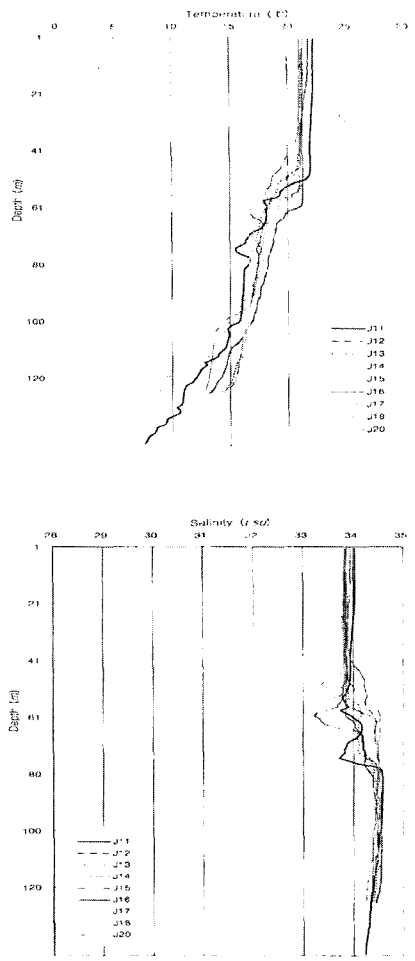

Fig. 5 Temperature (upper) and salinity (lower) at the area of Jung, the East/Japan Sea (Nov., 2000).

월에 비하여 그다지 크게 나타나지는 않고 있다. 11월의 염분 약층은 수심 45 *m* 부근에서 나타나는 데, 이는 8월의 관측결과와 비교해서 약 40 *m* 정도 낮아진 것이다. 그러나, 수심 80 *m* 이심에서의 염분은 8월과 11월 모두 34.0 *psu* 정도로 거의 일정하게 나타나고 있다.

한편, 동해 병 · 정 해역의 수평난류확산계수를 구하기 위하여 Drogue 관측을 수행하였다. 2000년 9월 18일 동해 정해역에서 오후 2시 10분에 35° 07.163′ N, 129° 48.559′ E 부근에 10개의 Drogue를 투입하였고, 익일 오후 6시 6분에 35° 07.164′ N, 129° 55.475′ E 부근에서 모두 회수하였다. 10개의 Drogue를 회수한 위치는 거의 일치하였다. 3시간 56분 동안에 Drogue가 이동한 거리를 계산하면 10.41 *km* 이다. 이를 Okubo(1971)가 제안한 식 (1)에 대입하여 계산한 결과 수평난류확산계수는 1.91276×10^{7} cm^2/sec로 나타났으며, 이는 한국해양연구원(1998)이 인공위성 추적부표를 사용하여 계산한 결과치인 $10^{7}\sim10^{9}$ cm^2/sec과 거의 유사하게 나타났다.

$$K_r = \frac{\sigma_{rc}^{\,2}}{4t} \tag{1}$$

여기서, K_r은 수평난류확산계수이고, $\sigma_{rc}^{\,2}$은 난류적 확산거리의 분산을, 그리고 t는 시간을 나타낸다.

3. 해양투기물의 침강실험

3.1 실험방법

입자의 침강속도를 구할 경우 일반적으로 침강수조(원통수조)를 사용한다. 그러나, 침강실험은 시간경과에 따른 부유농도를 구하기 위하여 부유물을 채취하므로, 이후의 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

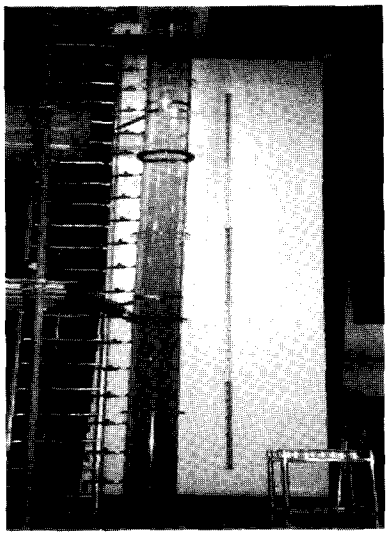

Photo 1 Experimental set-up.

*mm*의 원통수조에 연직방향 300 *mm* 간격으로 20개의 채수공을 설치하여 침강실험을 수행하였다.

수조 내에 작업유체를 6,000 *mm*까지 채우고, 여러 종류의 시료를 수조에 넣은 후 시간의 흐름에 따라 그 연직확산 정도를 파악하였다(Table 1). 정확한 측정을 위해 수조에 300 *mm* 간격으로 설치되어 있는 채수공으로 수조내의 작업유체를 채수하여 탁도계 DRT 1000으로 작업유체의 탁도를 측정하였다. 측정시간은 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240분의 간격으로 측정하였으며, 시료에 따라 그 이상의 시간 간격으로도 측정을 실시하였다.

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

탁도의 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 젝슨-혼탁도-단위(Jackson Turbidity Unit; *JTU*)를 사용한다. 한편, 실험에서 얻어진 탁도의 정도는 탁도-염분의 실험관계식으로부터 농도단위 (g/l)로 환산하였다.

수리실험은 먼저 약층이 없는 상태의 담수에서 수행하였으며, 염분차를 이용해서 밀도약층을 형성한 후에 동일 시료로 실험을 수행하여 그 결과를 비교하였다. Table 1에 각 실험 Case의 조건을 나타내었다.

3.2 실험결과

본 수리실험은 동해 투기장에서의 투기물질의 침강속도와 연직난류확산계수를 산정하기 위해 수행하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 실험은 Case Ⅰ~Ⅳ까지 각기 다른 시료와 조건을 적용하였다. 그리고 밀도약층이 없는 담수(Case Ⅲ)에서 시간에 따른 부유농도 분포를 나타낸 것이 Fig. 6 (upper)이며, 밀도약층이 있는 상태(Case Ⅳ)에서 시간에 따른 부유농도 분포를 나타낸 것이 Fig. 6 (lower) 이다. 한편, Photo 2는 Case Ⅳ의 초기확산 장면을 나타낸 사진이며, Fig. 7은 각 시료의 초기 침강속도 변화를 나타낸 것이다.

Case Ⅰ~Case Ⅲ의 결과를 보면 초기시간 50분까지의 연직부유 농도분포의 경사는 급경사를, 50분 이후부터는 완만한 경사를 보이고 있다. 전반적인 경향은 처음에 수심이 낮은 곳에서는 고농도의 분포를 보이고, 깊은 곳에서는 부유농도가 작다가, 시간이 경과하면서 전 수심에서 부유농도가 거의 같아지는

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	○

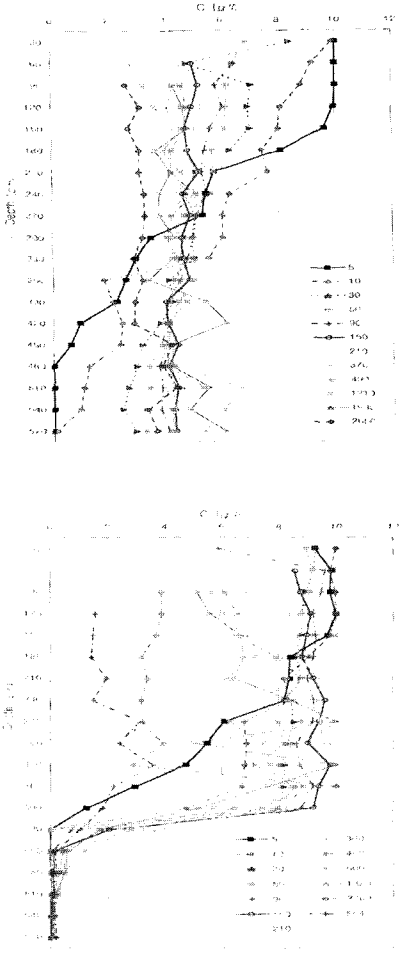

Fig. 6 Temporal variation of vertical distribution of SS concentration in Case Ⅲ (upper), Case Ⅳ (lower).

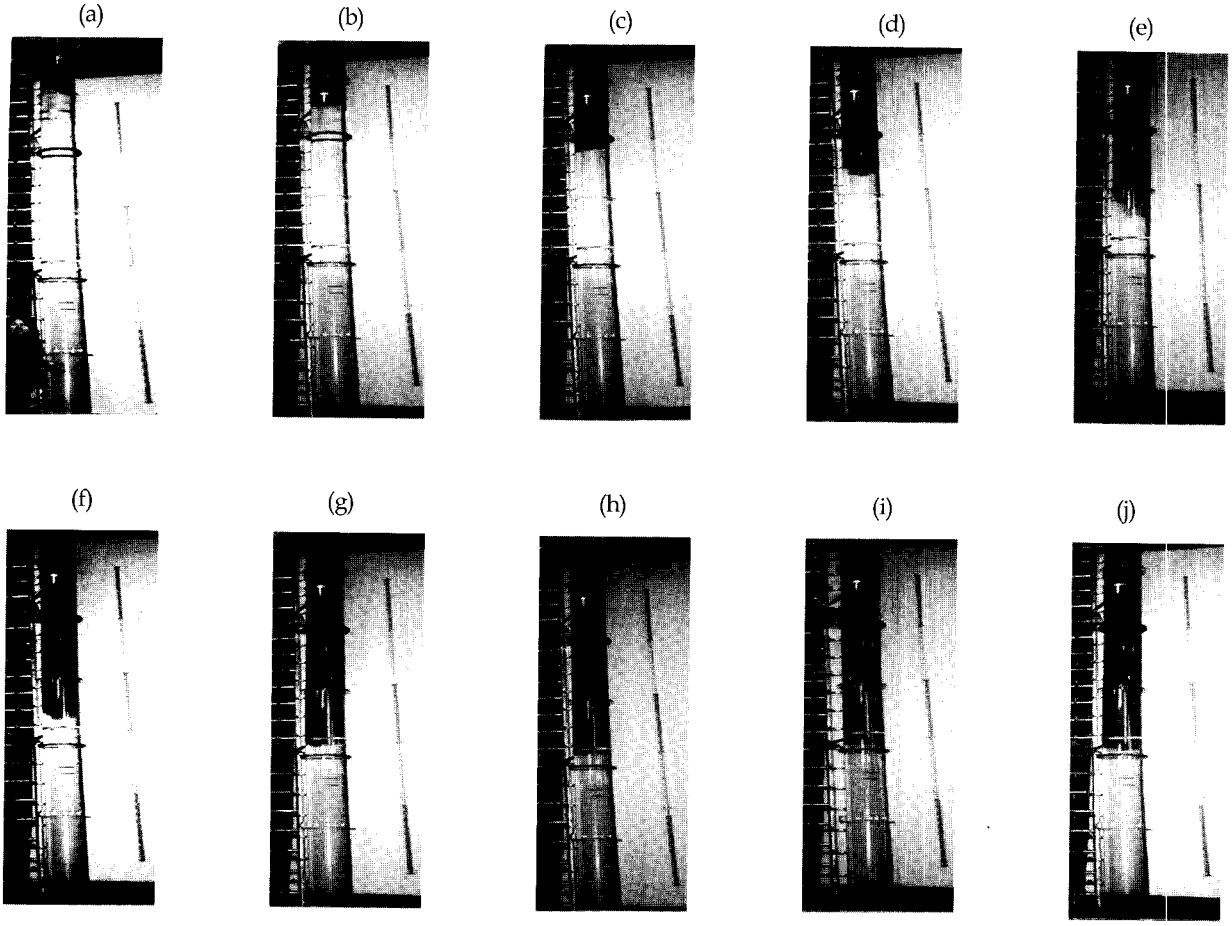

Photo 2 Experimental Photos of Case Ⅳ : after (a) 35 *sec*, (b) 60 *sec*, (c) 100 *sec*, (d) 120 *sec*, (e) 180 *sec*, (f) 220 *sec*, (g) 250 *sec*, (h) 310 *sec*, (i) 430 *sec*, (j) 580 *sec, respectively.*

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 나타 낸다. 전반적으로 농도가 시간이 지날수록 처음에 비해 작아지는 데, 이는 퇴적으로 인한 영향과 함께 채수로 인해 수조내의 작업유체와 부유물질이 점점 줄어드는 영향 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6 (lower)에서 밀도약층이 있는 부분에서 미세한 입자의 mud가 더 이상 침강하지 못 하고 있는 것을 살펴볼 수 있다. Photo 2에서도 다른 Case들과는 달리 밀도약층 부분에서 더 이상 침강하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

각 시료별 초기침강속도를 나타낸 Fig. 7을 살펴보면 시료의 비중과 초기농도 등으로 인해 속도가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Case Ⅰ의 침강속도는 1.5~1.8 *cm/sec*로 다른 시료에 비해 그 시간경과에 따른 변동의 폭이 크지 않음을 알 수 있다. Case Ⅱ의 침강속도는 시간경과에 따라 1.3~2.7 *cm/sec* 로 나타났으며, Case Ⅲ은 1.0~2.2 *cm/sec* 로 나타났다. 밀도약층이 있는 Case Ⅳ의 경우의 초기 침강속도는 1.1~2.6 *cm/sec*로 나타났다.

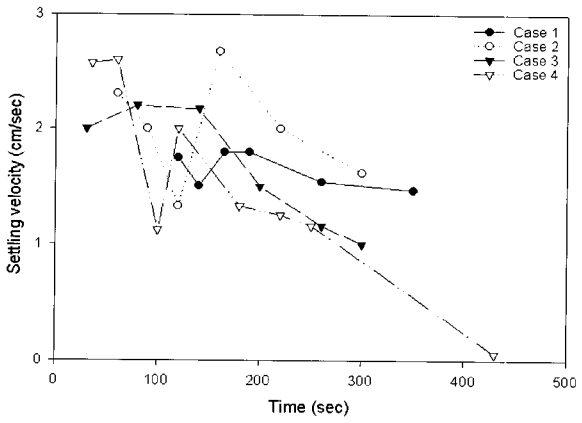

Fig. 7 Temporal variations of settling velocity by material type.

모든 Case에서 150 *sec*가 경과한 후에 부유농도가 낮아짐에 따라 침강속도가 점차적으로 작아지는데, 이는 본 실험에 사용된 시료의 입자가 혼합된 것이기에 시간이 경과하면서 굵은 입자는 빨리 침강해서 가라앉고, 미세한 입자만이 서서히 침강되기 때문으로 판단된다. 그리고 밀도약층이 있는 Case Ⅳ의

경우에는 침강속도가 거의 0에 가깝게 나타나서 약층 아래로 시료가 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, 즉, 협의의 확산에 의한 농도분포를 국부적인 이류의 성과로 보는 이론이 있다. 즉, 특정유체분자의 이동거리는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \int_0^t u(\tau)\,d\tau \tag{2}$$

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

$$K = \sigma^2 / 2t \tag{3}$$

식 (3)에 침강실험에서 얻어진 결과를 적용하여 각 Case별, 수심별 연직난류확산계수를 구하여 나타낸 결과는 Table 2와 같다. 연직난류확산계수는 각 시료와 수심에 따라 차이를 나타내고 있으며, 그 변화범위는 2.219×10^{-8}~8.874×10^{-4} cm^2/sec로 나타났다. Case Ⅳ의 결과를 보면 밀도약층 아래의 연직난류확산계수가 2.219×10^{-8}~2.937×10^{-7} cm^2/sec로 가장 작게 나타나는 데, 이는 연직난류확산계수에 밀도약층이 영향을 미치기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

해양투기물질의 확산 특성을 중심으로 한 해양투기물질의 거동 특성을 현장 관측자료 및 수리실험을 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 산정하여 동해 투기장 해역의 해양투기물질의 확산 특성을 고찰하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 동해 정해역의 CTD 관측결과를 보면, 동해 투기장 해역은 고온·고염의 쓰시마난류수의 영향을 직접적으로 받는 해역임을 알 수 있다. Drogue 관측으로 구한 동해 투기장 해역의 수평난류확산계수는 1.913×10^7 cm^2/sec로 나타났다.

(2) 침강실험의 결과, 초기침강속도는 시료의 비중과 초기농도에 따라 1.0~2.7 cm/sec로 다른 값을 나타내었다. 그리고 밀도약층에서는 더 이상 침강이 일어나지 않고 시료가 축적되는 것을 살펴볼 수 있었다. 이는 밀도약층이 발달한 해역에서의 투기물질의 연직확산을 고려한 침강율 계산시에 반드시 이러한 특징을 고려해야 한다는 것을 의미한다.

(3) 침강실험 결과로부터 산정된 연직난류확산계수는 시료의 종류와 수심에 따라 커다란 차이를 나타냈었으며, 2.219×10^{-8}~8.874×10^{-4} cm^2/sec로 나타났다. 또한, 밀도약층은 연직난류확산계수에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이러한 확산영역은 투기물질의 양에 따라 해역의 흐름과 확산 특성과 평형을 이루는 조건에서 안정된 상태로 분포할 것이나, 그 한계를 찾아내어야 할 것이다. 그리고 투기물질의 생·화학적 작용에 의한 시간지연 효과에 의한 확산영역의 감소에 대한 평가와 해역 환경용량의 검토에 따라 적정 투기량의 추정을 위한 기본과정이 정리되어야 할 것이라 사료된다.

Table 2 Vertical turbulent diffusivity from the result of experiments

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}

참 고 문 헌

김차겸, 이종섭 (1991). "실트질 점토의 침강 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제11권 제3호, pp 85-93.

노부호 (1993). "우리나라의 폐기물 해양배출제도와 국제동향", 한국해양학회지, 제28권 제2호, pp 137-141.

박용철, 최중기 (1993). "폐기물 해양배출에 대한 해양환경적 고찰", 한국해양학회지, 제28권 제2호, pp 142-152.

신동수, 배기성 (1998). "점착성 퇴적물의 침강특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제12권 제2호, pp 111-120.

한국해양연구원 (1998). "해양환경 감시 및 평가기술 (해양투기장 해역의 환경 모니터링 기술)", 3차년도 최종보고서, pp 53-171.

홍도웅 (2001). "해양투기물질의 확산 특성에 관한 연구", 부경대학교 대학원 석사학위논문, pp 76.

황규남 (2000). "새만금 갯벌퇴적물의 침강속도 산정을 위한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제20권 제2-B호, pp 277-286.

Okubo, A. (1971). "Oceanic Diffusion Diagram", Deep Sea Res., Vol 18, pp 789-802.

2001년 10월 24일 원고 접수
2001년 12월 11일 최종 수정본 채택