

연안수역에서 투기준설토의 초기거동에 관한 연구

정 대 득* · 김 지 연* · 신 승 호** · 이 중 우***

A Study on the Initial Behavior of Dredged Material Disposal in the Coastal Water

D. D. Jeong · J. Y. Kim, S. H. Shin · J. W. Lee

Key Words : 준설토(dredged material), 해양투기(ocean disposal), 연행(entrainment), 하강(descent), 폐기물(wastes), 성층(stratification), 이류확산(convective diffusion), 동적붕괴(dynamic collapse), 침강속도falling speed), 가우스분포Gaussian distribution)



Abstract

Investigation of the physical behavior of dredged material disposal in coastal water includes estimations of water column concentration in the receiving water, exposure time, the initial deposition pattern as well as thickness of material on the bottom. The conditions tested were intended to represent the disposal of material at the dumping fields near the estuary area. Calculation based on vertical settling and horizontal advection of single particles ignore the effects of bulk properties of the disposed material, vertical and horizontal diffusion, and material dilution due to the entrainment of ambient water during descent.

This paper focuses on the spatial and temporal changes in the dumping fields for the water column and bottom at a hypothetically confined coastal water, where the ambient time-invariant velocity and density profiles are applied, within the initial time period following the instantaneous release of the dredged material. This model accounts the behavior of material after release divided into three phases: convective descent, dynamic collapse and long-term passive dispersion

1. 序 論

최근 부산, 울산, 인천, 군산, 포항, 목포 등 대부분의 연안항만역에서 개발에 따른 대규모의 준설과 매립이 반복되고 있다. 또한 해운

항만청 및 부산시는 가덕지구의 동서안을 항만으로 개발할 것을 결정하고 예산의 확보는 물론 이에 대한 세부계획을 진행하고 있다. 가덕도 항만전설만 보아도 계획에 따라 달라지나 적어도 200만 m^3 이상의 흙이 준설되거나 매립

* 정희원, 한국해양대학교 대학원
** 정희원, 부산발전연구원 전임연구원
*** 한국해양대학교 이공대학 해양토목공학과 교수

으로 해상에 투기될 것이다. 가까운 예로 거제시가 옥포지역의 부족한 주택 및 공공용지 확보를 위해 옥포항 공유수면매립공사를 시행하면서 항내 퇴적물을 준설하고 이를 연안에서 14 km 떨어진 해안에 투기하고 있다. 이는 비단 옥포항 뿐만 아니라 대부분의 항만에서 수로 준설 또는 공유수면매립지의 저질 개선을 위해 공공연히 행해져 오고 있는 사항이며 일부는 해안선을 연장한 투기지역에 투입하기도 한다. 특히 해저에서 준설한 물질은 이토나 점토 및 기타 오염물이 혼재하고 있어서 육상의 매립용으로는 더욱 부적합하여 해상투기하는 것이 보편화되어 있다.

이와같이 해마다 하천, 하구역, 연안해역으로 부터 수많은 준설물질이 해안에 투기되고 있다. 개방해역에서 해안에 투기한 준설토의 거동은 환경학자, 공학자 및 관련분야의 운영 및 관리자 등의 커다란 관심의 대상이 된다. 특히 투기한 물질로 인한 환경영향과 해양생태계에의 노출이 심각하게 되어 최적 투기해역의 선정, 투기물질의 구성성분 분석, 투기방법 및 장·단기간 투기물질의 거동에 관한 연구가 매우 중요하게 되었다. 더구나 우리나라의 경우 유류사고로 인한 해양오염이나 하천을 통한 도시하수 및 산업폐기물의 방류에 대한 인식, 기타 각종 오물, 이물의 해상투기에 대한 인식이 아직 걸음마 단계에 머물러 있고 최근 우리나라의 각 해안에서 빈번한 유류사고에 대해서도 사고직후의 처리과정에서 일시적인 관심정도의 수준을 벗어나지 못하고 있는 실정이다.

해상에서의 대형유류사고에 따른 유처리제의 사용이나 항만에서의 오염물의 불법투기로 인해 오염물질이 해저에 쌓이게 되고, 추후 건설 및 유지과정에서 해저퇴적물의 준설시 준설토의 구체적인 거동에 대한 파악없이 연안매립지나 해안에 다시 투기되어 부차적인 오염 및 연약지반의 문제를 야기하는 것이다. 따라서 본 연구는 이러한 해상오염의 확산과 환경에 대한 인식을 다시하고 한편으로는 기술적으로 이에

대해서 더욱 접근해 보기위한 시도로 연안항만의 건설 및 확장이나 유지 및 관리에 항상 수반되는 준설토의 문제를 다루기로 하였고, 아울러 직접 또는 간접적으로 이 해역을 이용하거나 관계하는 이들에 대해 연안해역관리에 대한 관심을 고조되기를 바란다.

해외에서는 연안해역관리(CZM, Coastal Zone Management)라고 하여 법적인 지위 및 인식은 물론 환경보호국(EPA, Environmental Protection Agency)의 역할이 특히 해역에서 강조되고 있고 준설작업은 물론 준설토의 처리에 대한 규제나 방법에 대해서도 인적, 물적인 재원을 조달하여 많은 발전을 꾀해오고 있다. 특히 Abdelrhman(1993)은 준설선의 여러 투기구에서 개별적인 투기보다 선박에서 배출되는 물질의 일괄적인 거동에 대한 중요성을 지적한 바 있다. 여기서는 현재 한국항만의 사정으로 무심하게 행해지는 바와 같이 수심의 제약을 받는 연안해역에서의 준설토를 해상투기시 물리적인 초기거동에 대해서 다루고 이를 바탕으로 하여 후속연구가 이루어 지도록 하고자 한다. 초기거동에 대한 분석 결과는 침식, 수송 및 이어지는 재퇴적과정 등 장기간의 표사연구에 매우 유용하게 사용될 것이다.

현재까지 행해지고 있는 국내의 오염물의 확산에 대한 연구는 장기간에 걸쳐 단일 항목에 대한 수직단면 또는 해면상에서의 오염물의 분포에 국한되었고 퇴적물의 투기와 같은 3차원적인 확산 및 해저에의 퇴적분포에 대한 문제는 전무하다시피 했다. 이외에도 1차 또는 2차처리한 분뇨나 도시, 산업지역의 오폐물은 해상투기지역을 설정하여 지속적으로 투기하고 있는 현실에 이와 같은 연구는 투기물질의 추적 등 현장감시 프로그램에 좋은 도구로 이용될 수 있을 것이다. 투기준설토의 초기분석은 일반적으로 이물질이 수중에서 수직축을 따라 이류하강하여 주투기더미(main disposed bulk)에서 점차 분리되어 횡방방향으로 붕괴되면서 퍼져가다가 어떤 수심에 이르면 중립상태가 되어 떠있거나 바닥에 쌓이게 된다. 난류확산은 물질의 횡방향

퍼짐 특히 투기더미의 동적인 거동에 관계하게 되고 이류하강과 수중붕괴단계에서 주투기더미로부터의 분리과정에 영향을 미치게 된다.

본 연구의 목표는 초기 플룸 거동 및 이들이 시간에 따른 변형과 수중 및 해저에서의 물질확산에의 영향을 정성적으로 분석하고 나아가서는 방오막 또는 방파제 등과 같은 해안경계선이 존재할 때의 거동까지를 다루는 것으로 한다. 그러므로 i) 투기물질의 하강단계에서 이류단계를 모델화하고, ii) 투기작업에 이은 단시간동안 들질의 수직 및 수평수송과 확산을 분석하며, iii) 같은 시간내에 해안 및 해저의 영향으로 인한 공간적 시간적인 거동변화를 분석하는 것이 연구의 중요한 목적이 된다.

연구를 수행하기 위한 초기 이론과 모델은 일찍이 Koh & Chang(1973)에 의해서 개발되고 Brandsma & Divoky(1976), Johnson(1978)등이 브완 및 검정하였으며 미국환경보호국(USEPA)이 지속적으로 지원하고 있는 자동준설 및 투기 브완관리체계(Automated Dredging and Disposal Alternatives Management System, 1990)로부터 출발하기로 한다. 이론적인 배경은 Fan(1967)의 성층유체 또는 흐름하에서 난류부양성제트의 거동으로 거슬러 올라갈수 있으며 Koh & Fan(1970)은 열수의 방류에 따른 온도 분포의 모델화, Cederwall(1971)은 정체 또는 흐름조건에서의 부양성 슬롯제트의 연구, Almquist & Stolzenbach(1976), Roberts(1977)는 오염물 배출기(outfall diffuser)에서 방류된 부양성오염물의 확산특성을 다루었고, Fisher et al. (1979)은 연안내수해역에서의 혼합문제를, List (1982), Jirka(1982), Hossain & Rodi(1982)는 난류부양성제트와 플룸의 거동에 대해서 논하여 본 연구에 대한 기초이론이 수립이 되어있다고 본다. 후속절에서는 본 연구에서 사용하는 모델의 기본가정, 지배방정식과 모델의 적용, 결과의 토론 및 결론을 다루기로 한다.

2. 배경 및 가정

모델은 Fig.2.1 및 Fig.2.2와 같이 3단계로 준

설선이나 바지에서 순간적으로 투기되는 준설토의 거동을 시뮬레이션하기 위해 개발되었다. 일반적인 거동특성을 분석해보면 먼저 투기한 더미가 중력의 영향 및 초기에 부과된 물질의 밀도, 질량, 체적, 단위성질과 운동량, 부력, 마찰 등의 동적특성에 따른 이류하강단계로 투기물질은 후술하는 바와 같은 과정으로 주더미에서 분리되어 나간다. 다음의 단계는 동적붕괴단계로 더미의 전체 밀도가 주위의 해수밀도에 접근하여 부력의 중립수심에 이르거나 해저면에 닿하게 되는 경우로 하강은 점차 감소하고 수평방향의 퍼짐(spreading)이 현저하게 된다. 마지막단계로는 더미의 동적인 붕괴이후 강하게 나타나는 현상으로 물질의 투기과정에서의 동적특성보다 주로 주위흐름이나 난류의 영향으로 인한 수동적인 물질수송과 퍼짐으로 나타나는 데 이들은 더미의 이류하강단계나 수중붕괴단계에서의 특성에도 상당한 영향을 미치게 된다.

투기물질의 거동은 개별입자보다는 하나의 더미로 연행수(entrained water)에 의해 회석과 내부혼합이 이루어진다. 초기에는 반구(hemisphere)형상의 복합물질의 더미를 일시에 지정된 해역에 투기하였을 때 점차 그 더미가 커지고, 회석이 어떤 한계를 초과하는 경우에는 비교적 그 입자들이 각각 멀리 떨어지게 되며 투기물질의 더미가 더 이상은 하나의 단위체로 거동하지 않게 된다. 그 반면 주변수(ambient water)가 더미쪽으로의 연행이 작으면 항상 주변수의 밀도보다 높은 더미 밀도를 유지하므로 더욱 깊이가라앉게 되고 마침내는 바다에 까지 이르게 된다. 따라서 투기물질을 각각의 특성을 가진 여러물질이 통합된 더미로 다루는 것이 합리적일 것이다. 각 물질이 해저면에 도달하거나 주변수와의 밀도차가 미약하여 부양성 중립위치에 이르게 되면 수직방향의 운동은 제한되고 수평방향으로 동적퍼짐이 일어난다. 연행수가 더미의 중심쪽보다 표면쪽으로 더욱 많은 회석을 야기하면 소위 중간단계의 형태가 되어 이 경우 물질의 농도는 중앙에서 최대이고 더미의 표면에 향할수록 점차 감소하는 3차원 가우스분포

(Gaussian distribution)의 형태를 갖는 것으로 가정한다.

주변수가 하강하는 반구체의 더미로 연행하는 때에는 그 정도가 연행계수에 매우 민감하고 이때의 계수값은 투기되는 물질에 깊이 관계된다. Bowers & Goldenblatt(1978)의 실험실 연구에서는 연행, 항력 및 부가질량계수를 수분함량의 함수로 나타내었는데 이들의 결과를 본 모델에서도 도입하기로 한다. 이류하강의 과정에서 어떤 물질은 더미에서 떨어져 나가 주위의 물속에 개별입자의 침강속도(falling speed)로 하강할 것이며 이들 사이의 물과 용해된 오염물이 있는 경우에는 수중에서 하강하는 동안 더미에서 이탈될 것이다. 그러나 물질의 이탈과정은 아직 불명확하므로 여기에서는 이탈된 체적을 고정농도를 가진 더미의 외곽층에 해당하는 것으로 한다. 침강의 역제는 부유표사의 농도가 입자를 통과하는 물의 수직운동을 방해할 때, 즉 Stokes의 침전속도(Stokes settling speed)로 가라앉는 것을 방해하는 쪽으로 일어난다.

모델계산에서는 연행, 내부혼합, 이탈의 과정을 크기등급에 따라 이루어지도록 하였다. 특히 크기등급이 큰 경우, 조사(coarse sand)의 경우에는 미세한 점토 및 진흙범위에 해당하는 것보다 혼합이 잘 이루어지지 않는 것으로 한다. 모든 경우에 각등급에서의 농도가 3차원 가우스 분포를 따르는 것으로 한다. 마지막으로, 침강역 제층보다 농도가 낮은 표면층은 주더미에서 이탈되어 각 크기등급에서의 입자의 침강속도로 수중을 하강하는 것으로 한다. 이 때 고체의 농도가 이탈기준과 일치하는 반구표면의 반경으로 하여 수평방향으로는 2차원 가우스분포를, 수직방향으로는 일정한 값을 갖는 수심증분범위 내에서 재분포된다.

투기물질의 기하학적 형상은 이류하강의 과정에서는 반구형상을 갖게 되며 수중붕괴단계에서는 회전체의 형태로, 해저에서의 붕괴과정에는 반타원체의 형태로 변환되는 것으로 가정한다. 이류하강으로 주더미에서 물질이 이탈되거나 붕괴과정에서 더미로부터 이탈되어 침강

하는 경우는 수평면에서 더미의 사영과 비슷한 단면적을 갖는 실린더 형상을 갖는 것으로 간주한다. 상기형상의 체적, 표면적 및 사영면적은 모델내 여러부분에서 투기물질의 농도, 부력, 유체항력 및 표면 및 해저마찰을 계산하는데 도입된다. 해저에서 붕괴되는 경우에는 퍼짐의 결과 에너지 손실을 나타내기 위하여 해저면과 붕괴 더미간의 마찰력을 포함시키기로 한다. 수평 및 수직방향으로 난류확산으로 인한 퍼짐율의 예상치보다 동적붕괴로 인한 퍼짐율이 작을 때에는 붕괴단계는 종료하는 것으로 한다.

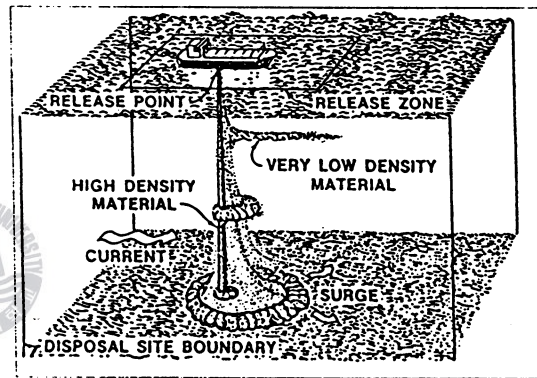


Fig. 2.1 Overview of deposition process from the barge

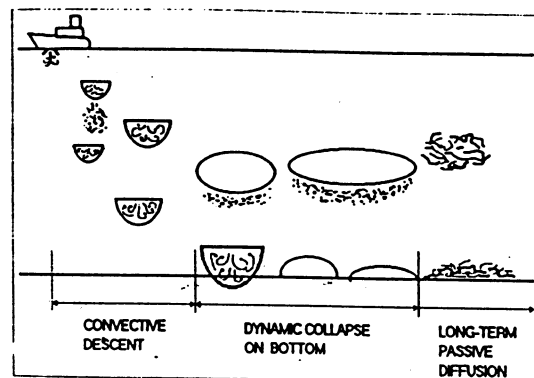


Fig. 2.2 Idealized view of dump of dredged material for development of the numerical model

3. 지배방정식

투기더미에서 고흥물의 농도는 보통 작으므로 각 더미는 밀도가 높은 액체의 형태로 다룰 수 있을 것이다. 따라서 이에 대한 기본 가정은 부양성 열역학적인 분석이 적합하다고 할 것이다. 수치모델수립을 위한 일반방정식은 대별해서 투기물질의 주더미에서 각 등급의 질량, 운동, 부력 및 도래의 질량보존식으로 나눈다. 물질내의 물과 고흥물의 존재는 고밀도의 부(-)부유거동을 가능하게 한다. 모델에서 도입한 일반방정식은 다음과 같으며 이에 대한 상세한 이론적인 배경은 Koh & Chang(1973)과 Brandsma & Divoky(1976)을 참조하기 바란다.

$$\frac{dm}{dt} = E\rho_a - \sum S_i\rho_i \quad (3.1)$$

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{F}_c - \vec{F}_D - \vec{F}_b + E\rho_a \vec{U}_a - \sum_i S_i\rho_i \vec{U}_a \quad (3.2)$$

$$\frac{d\vec{B}}{dt} = (E(\rho_{\infty} - \rho_a) - \sum_i S_i(\rho_{\infty} - \rho_i)) \vec{j} \quad (3.3)$$

여기서 m, \vec{M}, \vec{B} 은 3주요 보존파라메타로 질량, 운동량, 부력을 각각 나타낸다. 각 첨자 c, a, b, i, D, o는 투기물질 더미, 주변, 해저면, 표사의 등급, 항력 및 수면의 위치를 각각 나타내고 V 는 체적, E 연행된 체적, S 침전 또는 이탈에 의해 더미와 분리되는 체적, ρ 밀도, \vec{F} 외력 및 체력, U 유속, t 는 시간을 나타낸다. 위의 식은 이루어가 및 수중 또는 해저붕괴과정에 발생하는 투기물질 더미의 3가지 가능한 거동에 적용할 수 있다. 그러나, 각 방정식에 사용된 모든 항에 대해 거동단계에 따라 적절히 대응식을 치환하여야 한다.

더미사이의 물과, 고흥물질 및 보존 화학물질 등 구성성분 i 의 체적변화 P_i 는 다음 식과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{dP_i}{dt} = E - S_i - S_d \quad (3.4)$$

여기서 우측항은 각각 주변유체의 연행, 고체미립자의 침전, 덩어리의 붕괴를 나타내며, 이 방정식은 수질분석을 위해 내부에 용해되거나 퇴적물이 흡수한 오염물의 농도를 계산하는데 이용된다.

방정식(3.1)에서(3.4)에 포함된 각항은 Table 3.1과 같이 정의할 수 있다. 좌표축의 방향별 정의를 벡터형식으로 정의함으로써 수식을 일반화하였다. 모델에서 적용한 각종 초기조건 또는 계수는 Table 3.2와 같이 Abdelrhman & Dettmann(1993)에서 도입한 것을 참조하였다.

세립자는 바닥에서 붕괴더미의 상부층 수중에서 소산되는 것으로 하는데 이들 입자가 침전속도로 인해 주물질더미에서 이탈될지라도 식(3.5)와 같이 농도는 가우스분포로 특징지을 수 있는 작은 더미의 형태로 표시가 가능하다.

$$C = \frac{m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x-x_o)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_o)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-z_o)^2}{\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (3.5)$$

여기서 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 는 표준편차를 x_o, y_o, z_o 는 더미 중심의 좌표계를 나타낸다.

각 시간계산단계의 말에 각 물질더미는 도입한 흐름장 u, w 에 의하여 수평방향으로 이루어지며 더미의 새로운 중심은 경과시간분 Δt 에 대해 다음 식(3.6)과 같이 결정할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} x_{new} &= x_{old} + u \cdot \Delta t \\ z_{new} &= z_{old} + w \cdot \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

더미의 이류 및 수송에 부가하여 더미는 수평과 수직방향으로 난류확산에 의해 점차 커진다. 수평방향의 확산은 보통 4/3승 법칙(four-thirds power law)을 따르는 것으로 다룬다. 그러므로, 확산계수 $K_{x,z}$ 는 손실파라메타 a_i 를 사용하여 식(3.7)과 같이 주어진다.

$$K_{x,znew} = a_i L^{4/3} \quad (3.7)$$

이때 길이 $L=4\sigma_{x,z}$ 를 취한다. Brandsma & Divoky(1976)의 연구에 따르면 수평확산계수는 길이 $10^3\sim 10^4ft$ 의 길이에 대해 손실파라메타 값으로 $0.005\sim 0.00015ft^{2/3}$ 을 적용하여 $100ft^2/s$ 정도로 처리하고 있는데 모델에서 계산격자간격이 보통 $30\sim 100m$ 정도라고 하면 길이 $300m$ 이상의 경우에는 확산이 난류보다 평균흐름에 의해 이루어 지게 된다. 따라서 난류확산계수는 이에 준하는 것으로 한다.

확산에 따른 수평 및 수직방향의 더미의 증가는 식(3.6)과 같이 하여

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x,znew} &= \sigma_{x,zold} + \frac{K_{x,znew}}{\sigma_{x,zold}} \Delta t \\ \sigma_{ynew} &= \sigma_{yold} + \frac{K_y}{\sigma_{yold}} \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

여기서 K_{y0} 는 수직방향의 확산계수로 주변수성층상태나 표사의 성층상태의 함수로 주어진다.

특정시간계산단계에서 동적붕괴 이후의 결과는 각고형물질의 기여도를 합하여 각 격자점에서의 농도를 식(3.9)와 같이 하여 구할 수 있다.

Table 3.1 Mathematical definitions for the governing equations

No.	Definition and mathematical form
1	Cloud mass $m = V_c \rho$
2	Cloud momentum $\vec{M} = C_m \rho V_c \vec{U}$
3	Cloud buoyancy $B = V_c (\rho_a(0) - \rho)$
4	Cloud buoyancy force $F = V_c g (\rho - \rho_a)$
5	Entrained volume rate $E = A_E \alpha \vec{U} - \vec{U}_a $
6	Volume rate of solids leaving cloud $S_i = A_y v_{fi} C_{si} (1 - \beta_i)$ and $(S_d)_i = C_i V_d = C_i \Delta V_c$
7	Solid volume of the component in cloud $P_i = V_c C_{si}$
8	Fluid-induced drag forces on the cloud $\vec{F}_D = \frac{1}{2} \rho_a C_D A_{x,y,z} \vec{U} - \vec{U}_a (u - u_a)$
9	Bottom reaction force $-F_b = -V_c g (\rho - \rho_a) + \frac{d}{dt} [C_m \rho V_c v] + A_y \sum_i v_{fi} \rho_i C_{si} (1 - \beta_i) v$
10	Ambient density in the region of the cloud $\rho_a = \rho_0 (1 - \epsilon y) = \rho_0 (1 - \epsilon(a - y))$
11	Density inside the cloud $\rho = \rho_0 (1 - \gamma \frac{a_0}{a} \epsilon y) = \rho_0 (1 - \gamma \frac{a_0}{a} \epsilon(a - y))$
12	Vertical diffusion coefficient $K_y = K_{y0} (1 + \beta R_i)^{-2}$
	where $R_i = \frac{g \cdot \frac{d\rho}{dy}}{\left(\frac{du}{dy}\right)^2}$, Richardson No.

$$C_T = (2\pi)^{-3/2} \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\sigma_{xi}\sigma_{yi}\sigma_{zi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-x_{\alpha})^2}{\sigma_{xi}^2} + \frac{(y-y_{\alpha})^2}{\sigma_{yi}^2} + \frac{(z-z_{\alpha})^2}{\sigma_{zi}^2} \right] \right\} \quad (3.9)$$

여기서 N 은 고형물질의 종류를, y 는 수직방향 단면위치를 나타낸다.

물질의 수평이류 및 확산외에도 부유고형물의 침강도 발생하므로 각 격자점의 바닥에서 고형물질의 퇴적량 및 상당두께를 산정할 수 있다. 작은 더미의 형태로 된 각각의 물질은 정규분포를 가지는 것으로 가정하였기 때문에 퇴적물도 바닥에서 수평방향으로 정규분포를 갖는 것으로 한다. 이와 관련한 기본 가정은 일단 바닥에 퇴적하면 그 형태를 유지하여 침식이나 소류표사와 같은 작용은 없다는 점이다. 그러나 각 고형물질에 대해 해저에서 계산된 전단응력이 임계치를 능가하면 퇴적은 일어나지 않는 것으로 하므로 마찰로 인한 영향이 있는 곳에 대해서도 모델을 적용할 수가 있다. 이와 같은 가정은 용해성물질을 액상으로 하여 투기하는 경우에 고형물질의 이송 및 확산에도 적용할 수 있을 것이다. 아울러 수중에서나 해저에 퇴적한 고형물에 대해서는 오염물이 흡수 또는 방출되지 않는 것으로 한다.

Table 3.2 Initial values of the coefficients

Description	Value
Entrainment coefficient for convection, a	0.235
Entrainment coefficient for collapse, a	0.100
Drag coefficient for a sphere, C_D	1.000
Form drag coefficient, C_D	0.010
Skin friction coefficient, C_f	0.010
Bottom friction coefficient, C_f	0.001
Dissipation parameter, a_1	0.025
Vertical diffusion coefficient, K_{yo}	

4. 연안수역에서의 모델설정

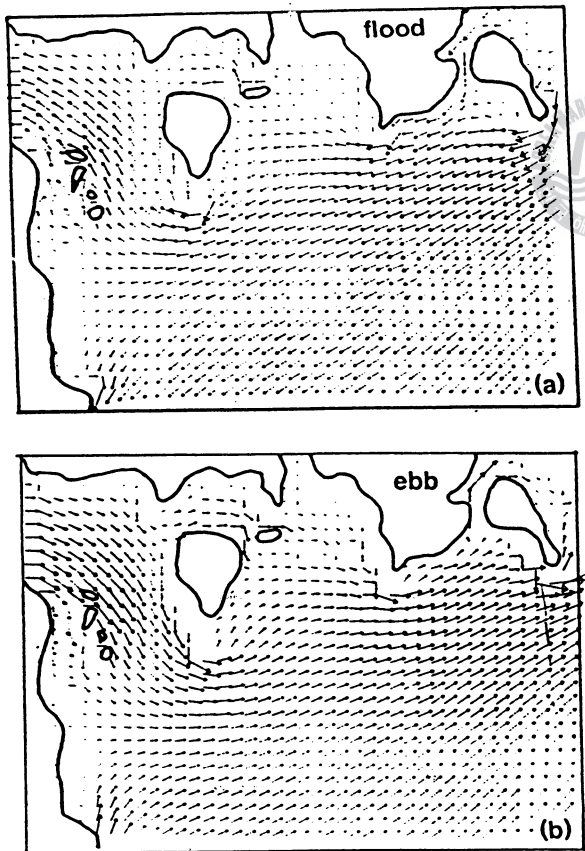
표준의 바지에서 더미의 밀도가 약 $1.6g/cm^3$ 인 $4000m^3$ 정도의 준설토를 연안수역에서 수직 평균 유속분포가 Fig.4.1에서 정의된 바와 같은 조건하에서 밀도분포가 해면(1.001)에서 해저면(1.024)로 성층화된 해역에 투기하는 것으로 하여 모델을 설정하였으며 해양투기후 바지의 홀수는 1.5m정도로 하였다. 모델의 특성을 파악할 수 있도록 해안선을 포함한 두가지의 유속분포를 도입하도록 하였으며, 투기물질은 비중이 2.7인 모래, 이토 및 점토 성분이 현저하며 다른 성분별 특징은 Table 4.1과 같은 조건으로 하였다. 여기서 오염물은 크롬, 납, 구리, 은 성분과 같은 중금속 성분이나 질소, 인, 암모니아와 같은 화학성분이 될 수도 있다. 약 10%의 이토와 점토성분이 침강속도 $30.48cm/s$ 인 덩어리 형태로 존재하는 것으로 가정하며 이들 성분의 특성은 Abdelrhman & Dettmann(1993)가 도입한 자료를 참조하였다.

모델의 격자크기는 41×32 로 격자간격은 70m로 하여 전체격자가 $6.27 km^2$ 의 해역을 포함하도록 하였고, 선택한 좌표계는 수직하향 방향을 y 방향으로하여 수심을 나타내었으며, 수평방향으로는 x, z 좌표계를 도입한 직교좌표계를 사용하였다. 이때 수심은 약 32m 정도를 갖는 것으로 하였다. 준설선은 좌표지점(16, 13) 즉, $x=1.05km, z=0.91km$ 에서 z 방향으로 2 km 로 이동하면서 2분내에 일괄 투기하는 것으로 하였다.

Table 4.1 Material characteristics

Solid class	Specific Gravity	Volume conc. (%)	Fall velocity (cm/s)	Depositional voids ratio	Critical Shear Stress
Silt & clay clumps	1.60	0.10	30.48	0.40	99.000
Sand	2.70	0.20	3.05	0.60	0.025
Coarse silt	2.67	0.07	0.31	3.00	0.010
Clay particles	2.65	0.05	0.06	5.00	0.002
Contaminant	1.00	0.15 (mg/l)	-	-	0.000

5. 모델결과 및 토론



여기서는 모델실험은 수심을 고려하여 투기 후 1시간동안만의 거동을 5분의 단위시간 간격으로 출력하도록 하여 검토하였다. 모델실험결과 주어진 조건하에서는 점토-이토의 덩어리와 모래와 같은 무거운 입자는 창낙조시 공히 30분 이내에 해저에 닿았으며 점토 및 이토, 오염물의 농도는 시간에 따라 점차 감소해감을 나타내었다. 해저에 이른 고형물은 산모양으로 쌓이며 해저흐름에 의해 이동된다. Fig.5.1은 투기 1시간후 창, 낙조시의 고형물질의 해저면 퇴적높이를 나타낸 것이다. 바지는 z방향으로 2kts로 이동하면서 투기하기 때문에 낙조시의 분포가 유하측으로 분명하게 나타나며 점토 및 이토의 덩어리 및 모래는 투기점 부근에, 나머지는 이와 떨어져서 유하측에 분포되었고 창조시는 이의 반대현상이 나타남을 가리킨다. 이와 같은 해저의 자욱내에 물질분포는 균일하지 않다. 즉, 후에 퇴적한 중간정도의 모래입자가 자욱의 유하측(down-current side)으로 더 이동된 상태를 나타내며 이토 및 점토덩어리와 굵은 모래입자는 유상측에 위치하게 된다.

또한, 비록 수심과 수평방향의 위치가 다르지만 격자상 오염물의 농도의 최대치를 시간축에 대해 도식화하면 Fig.5.2와 같다.

Fig. 4.1 Model boundary and applied flows :

(a) flood flow, (b) ebb flow

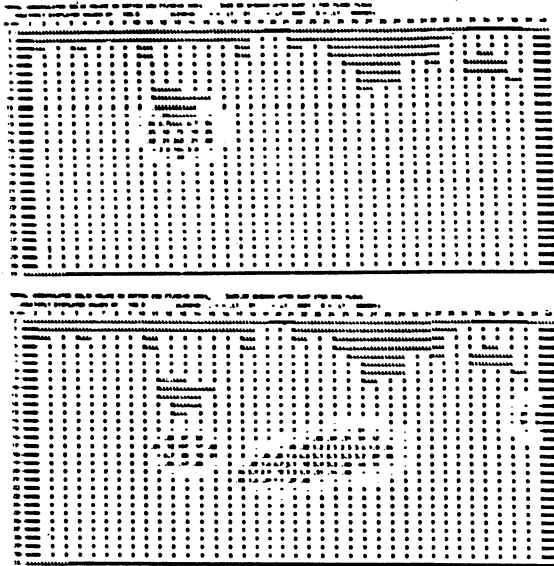


Fig. 5.1 Distribution of deposited solids after 1 hour

투기더미는 주변수를 연행하여 해면에서 32m의 수심까지 하강하는 동안에 점차 그 크기가 증가된다. 한편, 세립자는 앞에서 언급한 바와 같이 더미내부에서 재분포되며 이토-점토덩어리와 굵은 모래입자만 초기의 더미에 유지되면서 해저까지 이르는 동안 붕괴되면서 수평방향으로 퍼지게 된다. 일반적으로는 붕괴단계는 하강단계와 비교해서 그 시간이 짧으며 주더미의 하강속도는 해저면 부근까지 점차 감소한다

Fig.5.3은 투기후 1시간을 경과한때 혼합역을 나타낸 것으로 농도가 0.0032 mg/l(1)에서 0.001 µg/l(6)의 분포를 나타낸 것이다. 한편 개별입자의 침강속도, 확산계수 및 유동 등에 따라 이물질에 대한 공간적, 시간적 거동중에서 점토성분을 시간별, 수심별로 나타내면 Fig.5.4와 같다. Fig.5.4(a),(b),(c)는 각각 수심 3m, 15m, 30m지점에서의 분포를 가리키며 각 그림에서 1은 15분, 2는 30분, 3은 45분, 4는 1시간후 초기더미에서 이탈되는 과정을 나타낸다. 또한 수심 30m에서 30분 이후에 고형물질 및 오염물

의 분포는 Fig.5.5와 같으며 모래 및 이토-점토 덩어리는 초기단계에서 이미 바닥에 퇴적하여 그림에는 나타나지 않고 있다. 오염물만을 시간에 따른 분포로 나타내면 Fig.5.6과 같다.

CHANGE OF PEAK CONTAMINANT CONCENTRATION

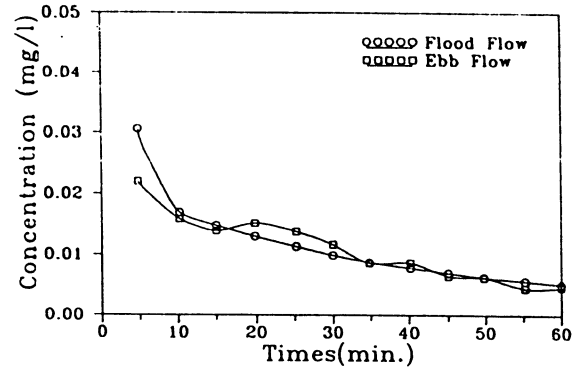


Fig. 5.2 Change of peak contaminant concentration in water column with respect to time

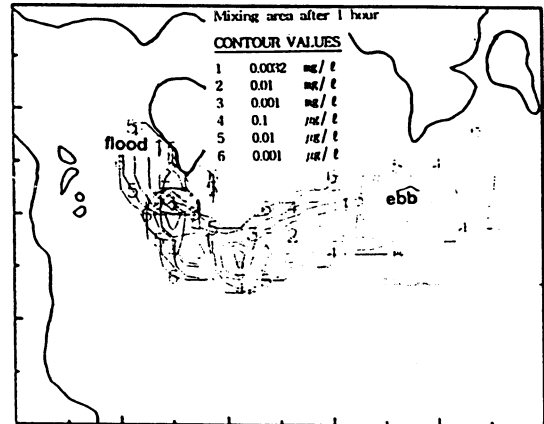


Fig. 5.3 Initial mixing zone for flood and ebb flow

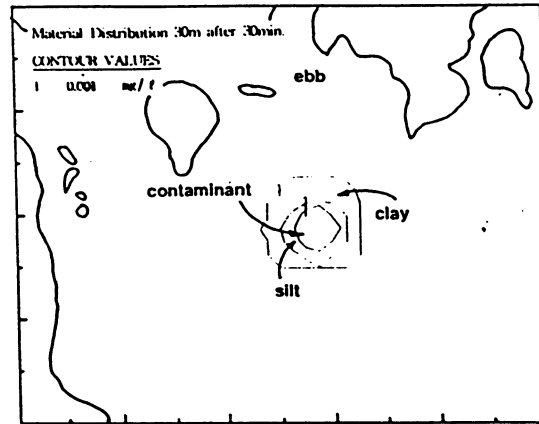
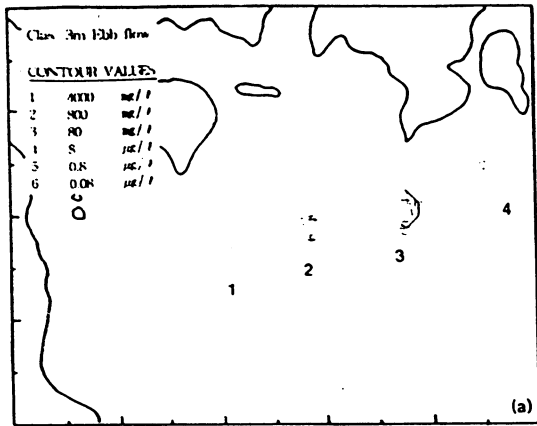


Fig. 5.5 Material distribution for 30m water depth(ebb flow)

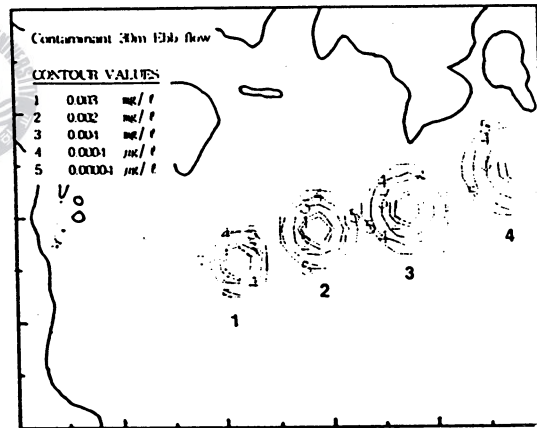
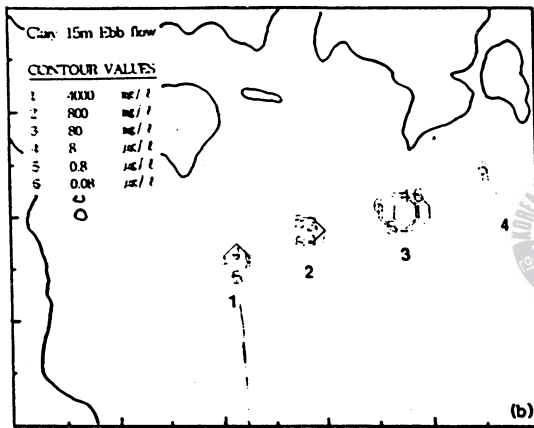


Fig. 5.6 Contaminant distribution for 30m water depth with respect to time(ebb flow)

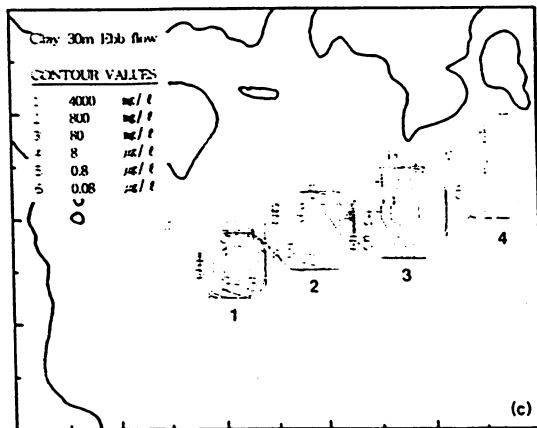


Fig. 5.4 Material distribution for the selected water depth(ebb flow, clay):
(a) 3m.(b) 15m.(c) 30m

6. 결 론

이상으로 준설선에서 연안해역에 투기한 준설토 더미의 성질은 수중에서의 지체시간 및 유동 및 성층상태와 관계하여 그 거동특성에 상당한 영향을 미치게 됨을 알았다. 수평방향의 확산은 수중과 바다에서의 영향권을 증대시키며

이는 수평방향의 유속, 선택한 확산계수 및 그 형식에 밀접한 관계가 있음을 알았다. 수직 및 수평방향의 회석은 수중의 농도분포를 특징짓게 되나 회석의 정도는 시간과 수중의 공간적 위치에 좌우된다.

실질적인 관점에서 해양에서 기존의 주변농도와 해양투기후의 농도와 관계가 관심을 갖게 된다. 도입한 수역에서 주변의 농도를 $10\mu\text{g/l}$ 라고 한 경우에 이의 결과를 시간과 공간적으로 잘 나타내어 보았다. 유도한 모델에서 여러 크기등급에 대한 내부혼합과정, 주투기더미로부터의 물질의 이탈을 계산하기 위한 접근등을 다루었다. 이와 같은 구조의 영향은 수중에서 비교적 거칠고 깊은 입자보다 가늘고 작은 등급의 입자들이 더미를 구성하게 되며 중심부에 여전히 잔류하려는 경향을 가지게 되어 이류하강의 단계를 연장하게 되나 수심의 제약으로 인해 해저에서 붕괴하여 퇴적하게 된다. 물론, 모델의 한계 및 모델을 구성할 때 도입한 여러가지 가정으로 이의 적용여부는 추후 현장에서 측정과 이러한 환경조건하에서 투기한 물질의 거동을 추적함으로써 입증할 필요가 있으며 이때까지는 여전히 모델결과를 해석하고 일반화하는데에는 상당한 주의와 노력이 필요하다고 본다.

도입한 모델은 유속이 시간적으로 변화하도록 조정이 가능하므로 연안해역에서의 준설 및 매립작업 등에 활용할 수 있으리라 사료된다. 앞으로 본 연구와 관련하여 특정해역에서 2차원적으로 조류와 같은 흐름의 특성을 시간적으로 도입하여 거동특성을 파악하고 3차원 흐름의 도입으로 실제의 해역에 적용하는 문제를 들 수 있으며 이를 추후의 과제로 둔다.

참고문헌

1. Abdelrhman, M.A. and Dettmann, E.H. (1993), "Dredged material transport at deep-ocean disposal sites," *Coastal Engineering Considerations in Coastal Zone Management, Coastal Zone '93 Conference*, ASCE, pp.216-230.
2. Almquist, C. W. and Stolzenbach, K. D. (1976), "Staged diffusers in shallow water," United Engineers and Constructors, Inc., New York, Report No. 213
3. Bowers, G.W. and Goldenblatt, M.K.(1978), "Calibration of a predictive model for instantaneously discharged dredged material," EPA-600/3-78-089, US Environmental Protection Agency, Corvallis, OR.
4. Cederwall, K.(1971), "Bouyant slot jets into stagnant or flowing environments," W. M. keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, Pasadena, California, Report No. KH-R-25
5. Fan, L. N.(1967), "Turbulent buoyant jets into stratified of flowing ambient fluids," W. M. keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, Pasadena, California, Report No. KH-R-15
6. Fisher, H. B. et al(1979), "Mixing inland and coastal waters," Academic Press, Inc., NY.
7. Hossain, M. S. and Rodi, W.(1982), "A turbulence model for buoyant flows and its application to vertical buoyant jets," *The Science & Applications of Heat and Mass Transfer*, Vol. 6(Ed. Rodi, W.), Pergamon Press, pp.121-178.
8. Jirka, G. H.(1982), "Turbulent buoyant jets in shallow fluid layers," *The Science & Applications of Heat and Mass Transfer*, Vol. 6(Ed. Rodi, W.), Pergamon Press, pp.69-120.
9. Koh, R.C.Y. and Chang, Y.C.(1973), "Mathematical model for barged ocean dis-

- posal of water," Environmental Protection Technology Series EPA 660/2-73-029, USEPA, WADC.
10. Koh, R. C. Y. and Fan, L. N.(1970), "Mathematical models for the prediction of temperature distributions resulting from the discharge of heated water into large bodies of water," Water Pollution Control Research Series No. 16130 DWO, Water Quality Office, US EPA
 11. List, E. J.(1982), "Mechanics of turbulent buoyant jets and plumes," The Science & Applications of Heat and Mass Transfer, Vol. 6(Ed. Rodi, W.), Pergamon Press, pp.1-68.
 12. Roberts, P. J. W.(1977), "Dispersion of buoyant wastewater discharged from outfall diffuser of finite length," W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, Pasadena, California, Report No. KH-R-35
 13. Teeter, A.M.(1984), "Vertical transport in fine-grained suspension and newly-deposited sediment," Lecture notes on coastal and estuarine studies, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, Ed. A.J. Mehta, Springer-Verlag, NY.

