

## 호퍼준설선의 투기특성

정 대 득\* · 이 중 우\*\*

Disposal Characteristics of Dredged Material from the Hopper Dredger

*D.D. Jeong · J.W. Lee*

**Key Words** : 최초준설(capital dredging), 유지준설(maintenance dredging), 연행수(entrained water), 가우스분포(Gaussian distribution), 부력중립(neutral buoyancy), 퍼짐(Spreading), 대표거리( representative distance), 제트성운동(momentum jet), 수동 이송·확산 단계(passive transport-dispersion phase), 4/3승법칙(four-thirds power law)

### Abstract

Hydraulic dredgers(Hopper dredger) are the most important piece of equipment in the entire harbor engineering field, and most suitable for the removal of sand and weakly consolidated sediment such as silt. In maintenance dredging, specially confined harbor or congested passage area, Hopper dredger is used most popularly because less obstruction and danger to navigation than other mostly stationary dredgers.

Investigation of the physical behave of dredged material disposal in coastal water from the Hopper dredger includes estimations of water column concentration in the ambient water, exposure time and dispersion pattern as well as thickness of material on the bottom. 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 analysis of dredging and dumping characteristics and the spatial and temporal changes in the dumping fields for the water column and bottom at a hypothetically confined coastal water. This model accounts the behavior of material after release from the hopper dredger. It is shown that the model describes the qualitative feature of prototype dumping process and its response.

\* 정희원, 한국해양대학교 대학원 물류시스템공학과 박사과정

\*\* 정희원, 한국해양대학교 해양토목공학과 교수

## 1. 서 론

하천, 하구, 항만 및 연안해역에서 연간 수백만 톤의 준설물질이 매립이나 해양투기로 다시 해양에 보내지고 있다. 산업화의 결과로 많은 형태의 오염물이 직접적으로나 퇴적물의 형태에서 준설로 다시 수중으로 유입되고 있다. 오염물은 수중의 부양성 퇴적물에 정착되어 흐름속도가 낮은 항만이나 하구지역에 퇴적하게 된다. 이로 인한 환경문제로는 i) 오염물질을 청정지역으로 확산시키며, ii) 준설로 인한 수괴의 교란으로 탁도문제가 야기된다. 또한 iii) 프로펠러 후류에 의한 침식이나, vi) 소음과 탁도가 높은 유출이 발생한다.

우리나라에서도 군산신항과 부산가덕신항개발이 주로 준설과 매립으로 이루어지고 있고 6개 신항만건설 계획에서도 대부분 준설과 매립이 주된 공사가 될 전망이어서 준설물의 처리와 이의 거동특성의 분석이 매우 필요한 시점이라 하겠다. 부산가덕신항계획에서의 준설량은 854만 $m^3$  정도이며 동·서방파제 및 작업부두 연약지반개량을 위한 굴착 지원 공법 적용시 발생되는 것만 222만 $m^3$ 에 이른다. 아울러 기존의 항만에서도 항만의 매물로 수로를 유지하기 위한 유지준설이 이루어지고 있고, 해안역에 신도시 건설로 발생하는 준설토의 처리문제로 어려움을 겪고 있는 실정에 있다. 우리나라에서는 80년대까지만 하더라도 준설토의 처리에 별다른 관심을 가지지 않았으나 일반 매립공사에서는 수질 및 어장보호라는 차원에서 보상을 두고 침예한 대립을 하고 있어서 이제는 준설토의 처리에 민감하게 반응할 것으로 판단된다.

준설은 물속에 있는 물질을 준설선(dredger)으로 다른 수역이나 육상으로 이동하는 것으로 준설대상에 따라 보통 최초준설(capital dredging)과 유지준설(maintenance dredging)으로 분류한다. 최초 준설은 교란되지 않은 물질을 최초로 제거하는 것으로, 작업 대상 물질은 대부분 단단하다. 이 작업에 사용되는 장비는 유지 준설에만 사용되는 것보다 더욱 강하고 강력해야 한다. 이에 비해 유지준설은 최근에 퇴적한 물질을 제거하는 것이다. 이런 물질들은 대부분 거의 압밀되지 않았거나 미약하게 압

밀되어 있다. 또한 수질개선을 목적으로 하는 환경 준설은 항만, 하천, 호소 등의 하부에 퇴적된 오염물질로 용존산소를 소모하거나 영양염류 및 중금속 등의 용출로 인해 수질이 악화될 경우에 실시하고, 저수용량확보를 위한 준설은 장기적으로 퇴적된 물질에 의해 호소의 저수용량이 감소되어 원하는 기능을 발휘하지 못할 경우에 실시한다.

준설물질을 투기하면 퇴적할 때 액상상태에서 자중하에 침강하고 평형상태에 도달할 때까지 액체상태를 유지하며 떠있다가 응집하면서 중력에 의해 침전이 일어나며 하부에는 침전물의 누적에 따른 압밀이 진행되게 된다. 최종단계에는 모든 침전물이 자중압밀하에 놓이게 되고 자중압밀이 완료된 후 평형상태에 이르게 된다.

준설물질의 해양투기로 인한 거동특성은 이전의 연구(정 등, 1995)에서 일차적으로 연구한 바 있다. 이전 연구에서는 바지로부터 단시간내 준설물질을 해양에 투기하여 흐름하에서의 거동특성을 모델화하였다. 이때 투기역의 환경, 투기물질의 성분, 투기방법 등이 준설물질의 단기간에 걸친 위치나 농도의 결정에서 주요인자가 된다. 투기물질의 거동에 관한 물리적인 과정을 수학적 모델로 다룰 수 있으면 해저면에서 물질의 초기 배열형태를 알 수 있을 뿐만 아니라 이와 같은 물질을 받아들이는 수역의 농도를 예측할 수 있을 것이다. 투기로 인한 혼합역을 결정하는데는 해당역에서 연직농도분포가 자주 이용된다. 특히, 저면에서 물질의 초기 배열형태는 침식, 수송 및 물질의 후속적 배치에 대한 잠재력을 평가하는 장기적인 표시연구에 필요적이다.

본 연구에서의 관심은 육상 및 해면매립 처리와는 별개로 해양투기와 관계된 투기물질의 거동특성에 있다. 부산가덕신항계획에서도 거제 동안에서 15~34km 떨어진 곳에, 기존의 허가받은 양식장 등 어업권 지정해역, 사격훈련해역, 해수이용 등의 제약을 받지 않으며 투기시 부유사 확산이 원활한 수심 30m전후의 곳을 해양투기 후보지로 선택하고 있다. 본 연구에서는 일단 저면까지 이를 때까지의 투기후의 과정을 규명하는 데에 있으며 최근 준설공사에서 주로 사용하고 있는 호퍼준설선

(hopper dredger)에서의 해양투기시 특성분석을 연구대상으로 하였다. 응집-침전-압밀의 과정은 육상에서 매립토의 거동과 동일한 형태로 다루면 될 것이다.

## 2. 준설 및 투기 특성

준설물의 육상처리가 곤란하거나 비용이 과다하게 요구될 때에는 해상투기로 매립지 확보 및 별도 처리시설 설치에 따른 비용절감 및 폐기물 안정처리를 도모한다. 해양투기는 투기지역의 광역성에 따라 준설토의 오염원의 희석에 의한 농도감소의 효과를 가지고 있으나 해양투기에 따른 주변환경에 미치는 영향은 결정인자의 다양성 때문에 정확한 예측이 어렵다. 오염되지 않은 준설물의 해양투기의 경우에는 주위 동식물 환경에 유익하기도 하지만 방오 호안이 없으면 투기물이 넓은 해역에 까지 분포하게 되며 특히, 수로유지 차원의 준설토의 경우는 세립물질이 많이 포함되어 있어 혼탁 등이 야기되므로 곤란하다. 오염된 준설물의 개방해역 투기시에는 반드시 방오호안 설치 후 투기하여 파랑과 흐름으로부터 오염물의 확산을 방지하여야 한다. 방오호안이 건설된 투기장은 수용능력이 충분하고, 수역으로 재방출되는 토사를 방지해야하

며, 경제성이 있어야 한다. 국제항만협회(IAPH, International Association of Ports and Harbor)의 보고에 의하면 준설 폐기물의 20~22%가 해양에 투기되고 있으며 이 양은 해양에 투기되는 폐기물의 80~90%를 차지한다(Per Brum, 1990).

Table 1은 전세계적으로 준설토를 처리하고 있는 방법을 정리한 것이다. 이 표에서 나타난바와 같이 준설토의 처리는 60%정도가 해안역 및 해양에 투기되고 있으며 내륙의 저습지를 포함하면 수역에 투기되는 비율은 86%에 육박하게 된다.

Table 2는 미국내 준설토 투기장의 분포와 투기역의 특성을 나타낸 것이다(Paul, 1983). 미국의 경우 해양투기의 특징은 수심이 1~20 m의 천해역에서 총투기의 70%가 이루어지고 있고 100 m 이하의 대륙붕에서는 86%를 차지하여 심해역의 투기는 많지 않은 것으로 나타났다. 심해에 투기하는 것은 비용이 많이 소요될 뿐만 아니라, 심해는 물리·화학적으로 매우 안정되어 있어 다른 해역에 비해 생물학적 분해율이 매우 낮고, 이곳에 서식하는 생물들은 환경변화에 대한 적응력이 극히 떨어져 환경에 미치는 잠재영향이 크기 때문인 것으로 사료된다. 투기면적도 1.72 km<sup>2</sup> 이하가 48%, 1.34 km<sup>2</sup> 이하는 92%정도로 이는 해역의 자정능력을

Table 1 Worldwide method of disposal(after John, 1992)

Region	Methods of disposal (Volume in thousands of Cubic Yard)					Total(%)
	Upland	Near wetlands	Shore	Ocean	Other	
Northern Europe	39,196	59,520	42,936	62,044	29,412	233,090(22)
Mediterranean	0	13,774	15,001	664	0	29,439(3)
Africa	0	152,942	76,471	25,549	0	254,992(24)
Southern Asia	62,484	11,197	121,831	89,149	0	284,661(26)
Southeast Asia	0	3,078	3,698	15,190	0	21,966(2)
East Asia	5,783	32,220	102,451	4,323	0	144,777(13)
South Pacific	3,972	2,687	26,335	32,588	0	65,582(6)
North America	6,012	9,696	8,459	16,549	159	40,875(4)
Caribbean	820	646	0	2,484	0	3,950(0)
Total	118,267	285,742	397,182	248,540	29,571	1,079,302
(%)	(11)	(26)	(37)	(23)	(3)	(100)

Source : Ad Hoc Dredging Commission, 1981 (PIANC,1990)

증대하기 위한 것으로 사료된다. 해안으로부터 거리는 5.6 km 이내의 연안역이 54%, 22.4 km 이하는 95%로 주로 해안과 가까운 연안역에서 투기가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 현재 우리나라에서 행해지고 있는 투기작업도 해안이나 도서역에서 14 km 전후에서 이루어지고 있다.

오염된 준설물질의 처리는 준설, 수송, 처리, 투기의 전과정에서 가능한 투기지역의 선정과 비용의 최소화 및 질적인 처리수준의 최대화라는 관점에서 검토되고 있다(Male et al, 1988a, 1988b).

준설공사는 굴착, 운반, 토사처분의 순서로 행해지고, 작업방법에 따라 기계식, 유압식, 기계/유압 병용식이 있으며 Table 3과 같은 특징을 지니고 있다. 호퍼선은 굴착한 준설물질을 선저에 설치된 문을 통해 투기시키기 전에 대형의 호퍼에 담아두고 있다. 이 준설 장비는 수심이 너무 깊어 파이프

라인 준설 장비 이용이 적절하지 않거나, 준설물의 준설구역이 산재한 경우나 선박의 항행이 빈번한 장소 및 투기장소가 준설지역으로부터 경제적인 거리에 위치하고 있지 않은 준설 작업에 유리하며, 선박의 왕래가 많은 국내항만에서 이의 활용이 커지고 있다.

자항식 호퍼는 다른 예인설비 없이 자유롭게 이동할 수 있다. 이 장비는 흡입관의 끝단을 강화한 원형의 흡입구를 가지고 있으며 저수심의 토양 퇴적물을 넓은 지역에 걸쳐 경제적으로 준설한다. 준설지역을 신속하게 항해 가능 계획수심으로 만들 수 있으며 바지가 필요하지 않으므로 항해에 장애물이 되지 않는다. 선박의 대형화에 의한 항만입구, 수로, 항내 등의 수심 증가의 필요성 때문에 예항식 준설선의 사용이 증가하고 있으며, 그 규모도 대형화 되어가고 있다.

호퍼 준설선의 시간당 출력은 펌핑 출력, 호퍼 용

Table 2 Characteristics of dredged-material ocean dump sites

Location	No. of Sites	Depth( m)			Size( km <sup>2</sup> )			Distance from shore( km)		
		Sh (1-20)	Int (21-99)	Dp (>100)	Sm (≤1.72)	Med (1.72-1.34)	Lg (≥1.34)	Near (≤5.6)	Int (5.6-22.4)	Dist (>22.4)
New England	5	1	4		2	3		2	3	
New York	6	5	1		1	5		5	1	
Mid-Atlantic	10	10			3	5	2	5	5	
South Atlantic	16		1	2	6	10	2	8	8	
Caribbean	4	13		4		4		3	1	
Gulf coast	50	49	1		19	22	9	26	18	6
South pacific	5			5		5			5	
L.A.	5		1	4	5			5		
San Francisco	8	2	3	3	6	2		5	2	1
Portland	17	8	9		17			13	4	
Seattle	1	1			1				1	
Alaska	3	2	1		3			3		
Total	130	91	21	18	62	57	11	70	53	7
Percent of total sites	-	70	16	14	48	44	8	54	41	5

Source : Pequegnat, 1980

주) ① Depth : Sh=shallow, Int=intermediate, Dp=deep

② Size : Sm=small, Med=medium, Lg=Large

③ Distance : Int=intermediate, Dist=distant

Table 3 Characteristics of dredgers

Type of Dredgers	Feature	Materials	Example	Others
기계식준설선 (Mechanical Dredger)	주변환경과 접촉(개방형)	고압밀도성의 자갈, 모래, 점토, 실트에 적합	Bucket dredger Grab dredger Dipper dredger	시공속도 빠르고, 여러 가지 농도의 물질을 소규모로 작업이 가능하고 유출 및 탁도증가를 가져옴
유압식 준설선 (Hydraulic Dredgers)	파이프라인으로 환경과 분리(폐쇄형)	저압밀도성의 모래, 실트에 적합	Trailing suction hopper, Dustpan dredger	운하, 항만 건설에 이용되며, 강, 운하, 수로의 유지준설에도 이용되고, 부두, 도크, 댐의 굴착 및 수중의 기초 작업에도 이용된다. 또한 습지나 늪의 매립을 위한 토사를 제공
기계/유압병용식 준설선(Mechanical/ Hydraulic Dredgers)	준설:기계식 운반:폐쇄형	구분없이 사용, 접촉성퇴적물을 기계적으로 분쇄하므로 탁도문제 해결	Disc bottom cutter, Auger dredger, Suction dredger w/ otter head, Bucket wheel dredger, Dipper dredger w/ pump, Plough w/ pump	기계식과 유압식의 장점을 활용한 것으로 수심이 깊거나 대규모 준설에 적용하나 공사비의 부담이 따름

량, 항해 속도에 의해 결정된다. 생산성을 높이기 위해서는 trailer의 시간당 운영비에 대해 시간당 준설량을 최대로 하고, 준설면적당 비용이 최소가 되도록 결정되어야 한다.

### 3. 이론적 배경

앞에서 논한 바와 같이 대부분의 준설토 처리는 해양에서 이루어지고 있고 이 또한, 수심이 얇고 해안에서 가까운 연안역에서 이루어지고 있는데, 여기서는 수심의 제약을 받는 연안해역에 투기지역의 선정이 이루어져 있다는 전제하에서 여러개의 빈(bin)을 가진 호퍼준설선에서 바다로부터 순차적으로 순간 해양투기시 투기물질의 거동을 분석해 보기로 한다.

호퍼준설선에서 일차적으로 투기되는 준설토의 거동은 투기더미가 중력의 영향, 초기에 부과된 물질의 밀도, 질량, 채적, 단위성질과 운동량, 부력, 마찰 등의 동적 특성에 따른 이류 및 하강을 하게 되고, 더미의 전체 밀도가 주위의 해수밀도에 접근하여 부력의 중립수심에 이르거나 해저면에 닿으면 동적인 붕괴로 수평방향의 퍼짐이 가속되고 주위의 유속에 따라 수동수송 및 확산단계에 이른다.

투기물질의 거동은 개별 입자보다는 하나의 더미로 연행수 (entrained water)에 의해 회석과 내부 혼합이 이루어지며, 연행수가 더미의 중심쪽보다 표면쪽으로 더욱 많은 회석을 야기하면 물질의 농도는 중앙에서 최대이고 더미의 표면에 향할수록 점차 감소하는 3차원 가우스분포 (Gaussian distribution)의 형태를 갖게 된다. 이와 같은 과정은 바지에서의 순간적 준설토의 투기형태(정 등, 1995)와 차이가 없다.

어떠한 형태의 해양투기에서든지 이류하강단계에서 연행으로 인해 투기한 덩어리나 제트는 커지며, 종국적으로는 해저에 닿거나 투기물질과 주변수의 밀도차가 작을 경우에 부력중립(neutral buoyancy)의 위치에 놓여 떠있게 된다. 이때에 양쪽의 경우 모두 수직방향의 운동은 정지되고 수평방향의 동적인 퍼짐(Spreading)이 일어나는 것이다. 그러나 바지에서 순간적 해양투기에서는 전체의 반구형(hemispherical type)덩어리가 한꺼번에 해저면에 닿게 되는 반면에, 호퍼선의 순차적 투기에서는 한 개나 두 개의 빈에서 투기작업이 진행되며 이전의 빈에서 투기작업이 끝남과 동시에 다음의 빈에서 투기하게 되어 연속적인 제트형 방류가 된다. 제트가 해저면에 닿게 되면 붕괴단계는 밀도

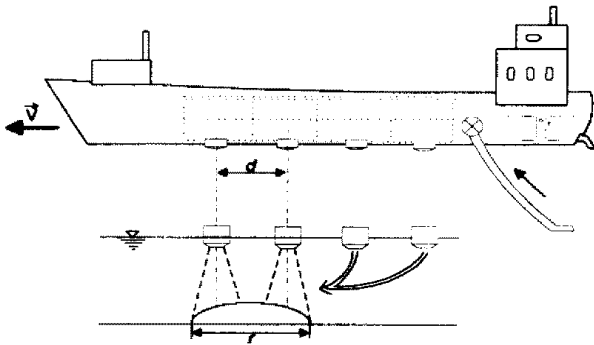


Fig. 1 Illustration of idealized hopper dredger's working

및 고형물질의 농도를 가진 물질의 연속적인 투입이 이루어지면서 타원체가 깨어지는 형태가 된다. 준설선의 속도나 유속에 따라 투기위치점에 변동을 가져오며, 여러 빈이 동시에 열어 투기할 경우에는 붕괴시 덩어리의 초기 크기는 대표거리 (representative distance = 빈사이 거리의 반,  $d/2$ , Fig. 1 참조)만큼 조정되어야 한다. 대표거리 및 무차원화한 덩어리의 농도 분포, 퍼짐에 대한 이론적 도입은 Kuo et al(1985)과 横山長之(1980)에 상술되어 있다.

Fig. 2는 호퍼준설선에서 해양투기가 이루어질 때의 투기물질의 거동을 일반화시킨 것이다. 호퍼선의 빈에서 바다의 문으로 방류되는 점 부근의 흐름은 침강제트성 운동(sinking momentum jet)을 나타낸다. 제트형 이류단계에서 보존방정식의 수립에 필요한 기본적인 가정은 제트단면이 원형을 유지하며 이때의 속도, 밀도 및 물질의 농도분포가 모자를 놓아둔 형태로 근사화하는 것이다. 연행(entrainment)은 제트성 운동 연행과 2차원 온도분포로 나타나는 연행의 결합한 형태로 가정한다. 연속적 투기로 인한 제트형 플룸이 형성되어 해저면에 닿지 않고 방류점에서 하류측으로 멀리 움직이게 되면 이동 속도가 주변수의 유속과 같아지게 되고 이의 거동은 제트성 운동보다 2차원 온도분포와 같은 양상(수동 이송 및 확산단계, passive transport-dispersion phase)을 나타내게 된다.

수치모델수립을 위한 일반방정식은 대별해서 투기물질의 주더미에서 질량, 운동량, 부력 및 고형

물의 질량보존식으로 나누고 해저면에 닿을 경우는 마찰력을 포함시킨다. 모델에서 도입한 이들 방정식의 상세한 배경 및 형태는 이전의 연구(정 등,

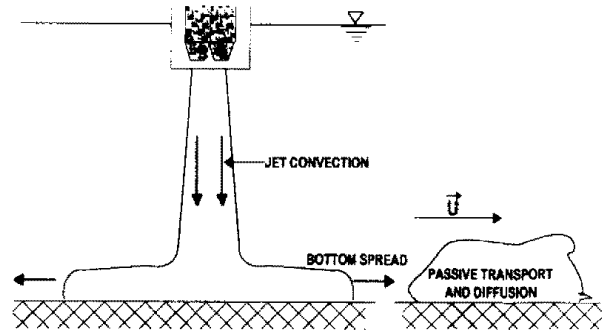


Fig. 2 General diagram for the hopper disposal

1995), Koh & Chang (1973) 및 Brandsma & Divoky (1976)을 참조하기 바란다.

동적붕괴단계에서 퍼짐율이 수직 및 수평방향의 난류확산으로 인한 퍼짐율보다 작아지면 붕괴단계는 끝난다. 붕괴하는 동안 고형입자는 침강속도로 가라앉아 침강하게 된다. 이것이 투기물질의 주 덩어리에서 떨어져 나올 때는 작은 더미 형태를 취하게 되며 수중의 수직방향으로 식 (1)과 같은 농도를 가진 가우스분포로 특징지을 수 있다.

$$C = \frac{m}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-z_0)^2}{\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (1)$$

여기서  $m$  은 더미의 총 질량,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  는 표준편차,  $x, y, z$  는 공간좌표계를,  $x_0, y_0, z_0$  는 더미중심의 좌표계를 나타낸다.

각 시간계산 단계에서 각 더미는 도입한 흐름장의 유속  $u, v$  에 의하여 수평방향으로 이류되며 경과시간  $\Delta t$  이후 더미의 새로운 중심은 식 (2)로 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{new} &= x_{old} + u \cdot \Delta t \\ y_{new} &= y_{old} + v \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

이류 및 수송에 부가하여 더미는 수평과 수직방향의 난류확산에 의해 점차 커지는데, 여기서는 식 (3)과 같이 수평방향의 확산을 보통 4/3승 법칙 (four-thirds power law)을 따르는 것으로 하였다. 따라서, 수평방향 확산계수  $K_{x,y}$  는 손실파라메타  $a_i$  를 사용하여 식 (3)과 같이 주어진다.

$$K_{x,ynew} = a_i L^{4/3} \dots\dots\dots (3)$$

이때 길이  $L=4\sigma_{x,y}$  를 취한다. 수평확산계수는 Brandsma & Divoky (1976)의 연구결과인  $10^3 \sim 10^4 ft$  의 길이에 대해 손실파라메타 값은  $0.005 \sim 0.00015 ft^{2/3}$  으로 두어 정리하면  $100 ft^2/s$  정도가 된다. 확산에 따른 수평 및 수직 방향의 더미의 증가는 식 (4)와 같다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x,ynew} &= \sigma_{x,yold} + \frac{K_{x,ynew}}{\sigma_{x,yold}} \Delta t \\ \sigma_{znew} &= \sigma_{zold} + \frac{K_z}{\sigma_{zold}} \Delta t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $K_z$  는 수직방향의 확산계수로 주변수성 층상태나 표사의 성층상태의 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$K_z = \frac{K_{z_0}}{(1 + \beta_i R_i)^2} \dots\dots\dots (5)$$

이 때  $K_{z_0}$  는  $R_i=0$  일 때  $K_z$  의 값이며,  $\beta_i$  는 침전계수로 자유로운 침전을 0이라 하고 침전이 없는 경우를 1로 하여 그 사이값을 취하는 것으로 정의하면 식(6)과 같다.

$$\beta_i = \begin{cases} 0, & \left| \frac{w}{w_f} \right| < 1 \\ \beta_0, & \left| \frac{w}{w_f} \right| \geq 1 \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

여기서  $\beta_0$  는 상수이고, 0~1사이의 값이라 가정한다.  $w$  는 더미의  $z$  방향 속도성분,  $w_f$  는 고

체의 하강속도이다. 또한,  $R_i$  는 Richardson No. 로 식(7)과 같이 정의된다.

$$R_i = \frac{g \cdot \frac{d\rho}{dz}}{\left( \frac{du}{dz} \right)^2} \dots\dots\dots (7)$$

이 때  $g$  는 중력가속도,  $\rho$  는 밀도,  $u$  는 더미의 수평방향 속도성분이다.

임의시간에 동적붕괴 이후의 각 격자점에서의 농도는 각 더미의 기여도를 합하여 식 (8)과 같이 하여 구할 수 있다.

$$C_T = (2\pi)^{-3/2} \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\sigma_x \sigma_y \sigma_{zi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{(x-x_{oi})^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-y_{oi})^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-z_{oi})^2}{\sigma_{zi}^2} \right] \right\} \dots\dots\dots (8)$$

여기서  $N$  은 고형물질의 종류를,  $z$  는 계산하고자 하는 수직방향의 단면위치를 나타낸다.

한편, 투기물질의 수평방향 이류 및 확산외에도 부유사의 침전이 일어난다. 따라서 각 격자점에서 해저면에 퇴적되는 고형물질의 양 및 상당 퇴적두께를 결정할 수 있다. 이때 일단 바닥에 퇴적된 물질은 그 자리에 남아있어서 소류사는 허용되지 않는 것으로 하여 계산하면 된다. 이와 같은 가정은 단기간의 투기물질에 대한 거동분석에서는 충분하다고 볼 수 있다.

#### 4. 수치계산

개발한 수치모델은 호퍼준설선에서 연차적으로 투기된 물질의 물리적인 거동을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 호퍼준설선에서 빈내의 준설물질이 고형물질, 오염물 및 액체성분에 대한 농도에 관심을 가지고 주어진 수심에서 준설물질의 투기로 인한 수직방향의 물질의 농도에 대한 분석을 다루고자 한다. 혼합역을 정의하고 이 혼합역의 경계에서 준설물질의 농도분포를 계산하여 정해진 허용농도와 비교하는 것을 목적으로 하였으며, 초기 혼합과정이 나타나므로 이 과정을 하강, 붕괴, 장기확산

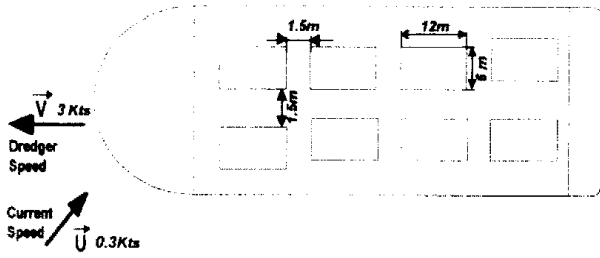


Fig. 3 Schematic plan view of a hopper dredger with 8 bins

의 단계로 정의한 수식에 따라 혼합되는 것으로 하였다. 준설물질의 투기 이전에 혼합역과 회석정도를 초기농도의 백분율로 나타낸 회석정도를 0.4% 정도로 설정하였다.

모델의 격자 크기는 35×35로 격자간격은 45m로 하여 전체격자가 2.34 km<sup>2</sup>의 해역을 포함하도록 하였으며, 수심은 약 30m로 하였다. 준설선은 좌표 지점(8,8) 즉, x방향으로 0.31 km, y방향으로 0.315 km에서 투기작업을 시작한다.

준설물질을 투기하는 호퍼선의 빈의 평면도는

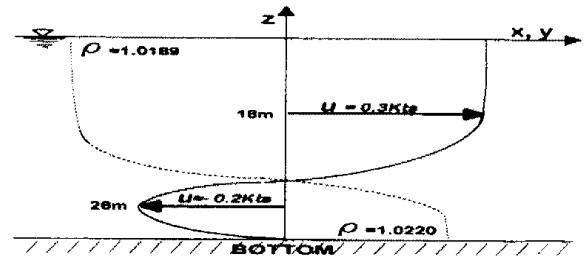


Fig. 4 Vertical distribution of currents ( $\vec{u}, \vec{v}$ ) and density ( $\rho$ )

Fig. 3과 같다. 그림에서 빈의 규격은 가로, 세로가 각각 6m, 12m이고, 전후좌우의 빈의 간격은 1.5m, 빈의 수는 8개이다. 각 빈의 문은 가로, 세로가 2m, 4m로 해서 투기시 단면적이 8m<sup>2</sup>이 되며 이것은 극 좌표형으로 하면 반경이 1.6m인 원형으로 투기된 것과 같다. 이 호퍼선에서 투기방식은 펌프식이 아니라 호퍼의 빈을 통하여 선저로부터 투기되는 형식을 취하고, 한차례에 2개의 빈에서 투기가 이루어져서 전체를 비우는 데는 4회의 연차적인 작업과정을 거치며, 모든 빈을 비우는 데는 현장여건을 고

Table 4 Initial values for the model coefficients

Description	Coefficient Values		
TURBULENT THERMAL ENTRAINMENT	ALPHA0	=	0.235
SETTLING COEFFICIENT	BETA	=	0.000
APPARENT MASS COEFFICIENT	CM	=	1.000
DRAG COEFFICIENT FOR A SPHERE	CD	=	0.500
RATIO--CLOUD/AMBIENT DENSITY GRADIENTS	GAMA	=	0.2500
FORM DRAG FOR COLLAPSING CLOUD	CDRAG	=	1.000
SKIN FRICTION FOR COLLAPSING CLOUD	CFRIC	=	0.010
DRAG FOR AN ELLIPSOIDAL WEDGE	CD3	=	0.100
DRAG FOR A PLATE	CD4	=	1.000
ENTRAINMENT IN COLLAPSE	ALPHAC	=	0.100
FRICTION BETWEEN CLOUD AND BOTTOM	FRICTN	=	0.010
4/3 LAW HORIZ. DIFF. DISSIPATION FACTOR	ALAMDA	=	0.001

Table 5 Disposed material characteristics

Discription	SPEC. GRAV. or DENSITY (GM/CC)	VOLUMETRIC CONCENTRATION (VOL/VOL)	FALL VELOCITY (MPS)	DEPOSITIONAL VOED RATIO	CHARACTER	CRITICAL SHEAR STRESS FOR DEPOSITION
SAND	2.700	0.1000	0.10000	0.6000	NONCOHESIVE	0.2500E-01 LBS/SQ. FT.
SILT	2.650	0.700E-01	0.01000	3.000	COHESIVE	0.1000E-01 LBS/SQ. FT.
CLAY	2.650	0.4000E-01	0.00200	5.000	COHESIVE	0.2000E-01 LBS/SQ. FT.



려하여 5분이 소요되는 것으로 한다. 호퍼선에서 투기 홀수는 투기시작점을 결정하는 중요한 인자이므로 모델실험에서는 투기 전후의 홀수를 필요로 한다. 모델에서 사용한 전후의 홀수는 6.1m와 2.4m로 하였다. 보통 호퍼준설선은 자항식으로 작업시 선속을 유지하게 된다. 전 준설물질의 투기과정중 약 3노트의 선속을 가지는 것으로 하였다. 주변수의 유속 및 밀도분포는 연안역에서 쉽게 찾아

볼 수 있는 형태로 Fig. 4와 같이 성층이 이루어진 것으로 하였다. 또한, 모델에서 적용한 물질의 특성은 Table 4 및 Table 5와 같다.

### 5. 결과 및 토론

모델적용으로 지정해역에서 고형물질의 수직농도분포와 설정 수심에서의 액상 투기물과 주변수의 체적비를 계산하게 된다. 따라서, 투기물질이 바닥에 가라앉기 전에 모든 격자에서 설정 수심에 대한 모래, 이토, 점토의 농도를 계산하게 되며 수치실험을 행하는 동안 설정 수심 뿐만아니라 각 격자점 어디에서든지 발생할 수 있는 최대 농도치를 나타내도록 하였다. Fig. 5는 호퍼준설선으로부터 해상투기직후에서 1시간 동안 모델실행후에 12m의 수심에서 해당 격자에 투입된 준설물의 평면분포를 나타낸 것으로 준설선의 이동속도 x방향 3kts, 및 유속의 영향으로 투기시점으로부터 x, y 방향에 분포하고 있다.

수치실험하는 전 기간에 대해 수심 12m에서 액상물의 수직농도분포는 Fig. 6(a),(b)와 같다. 전체 격자에서 설정된 수심에 대해 이토와 점토의 최대 농도는 시간에 따라 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 반면에 혼합역 밖에서는 혼합역에서부터 멀어져 감에 따라 플룸의 농도가 증가하는 것

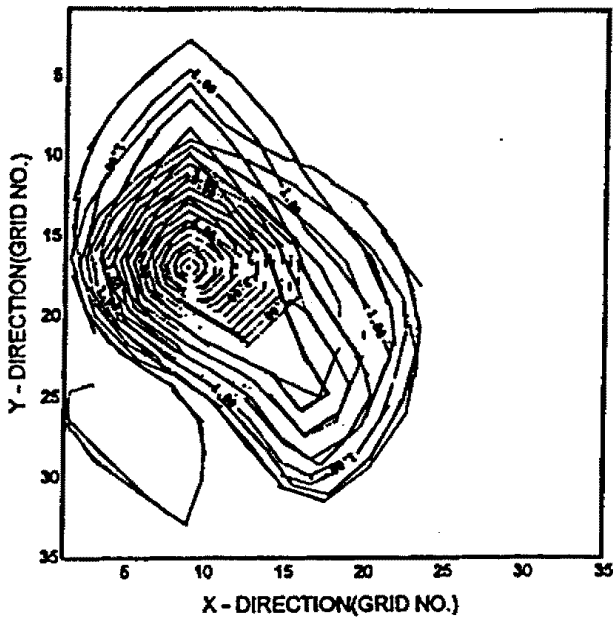


Fig. 5 Mixing zone contours at 12m depth after 1 hour from the disposal

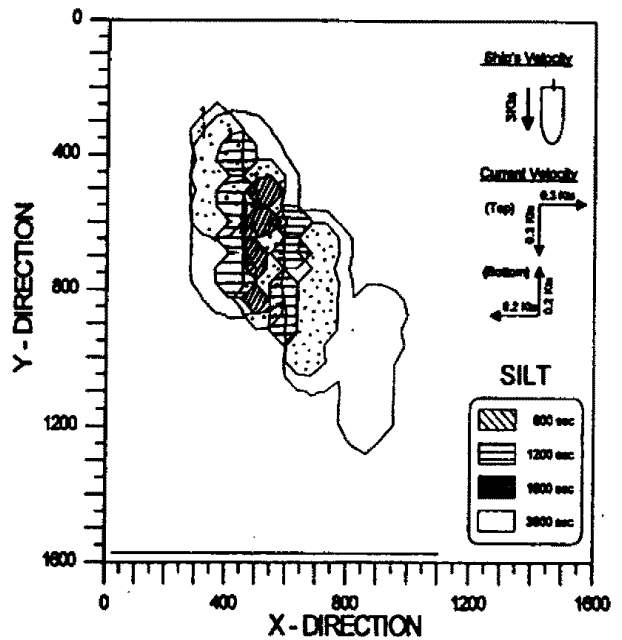
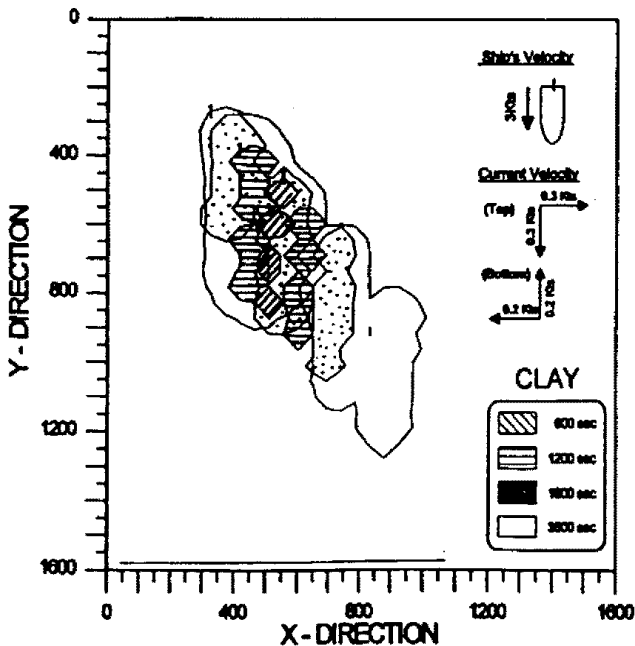
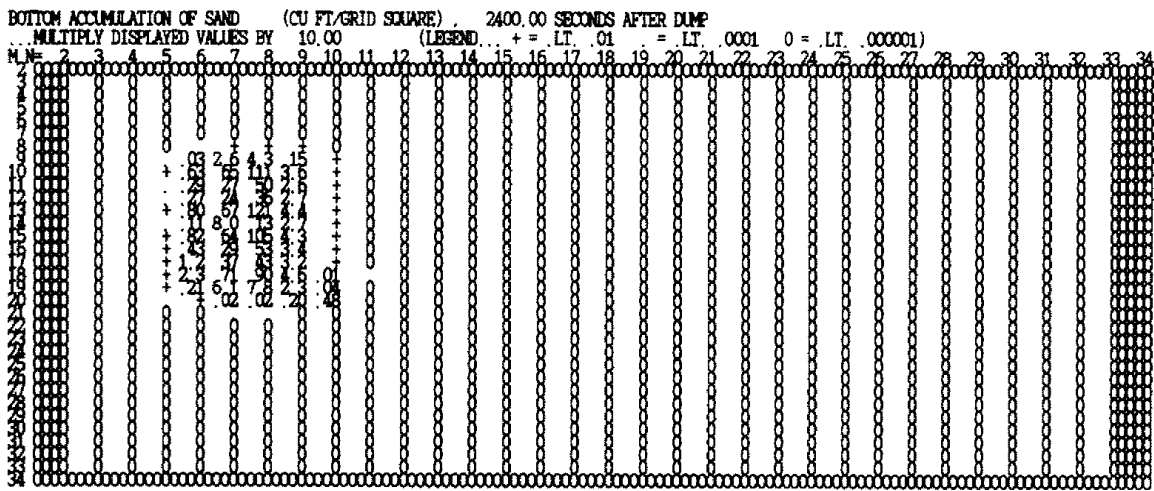


Fig. 6 Material distribution with respect to time

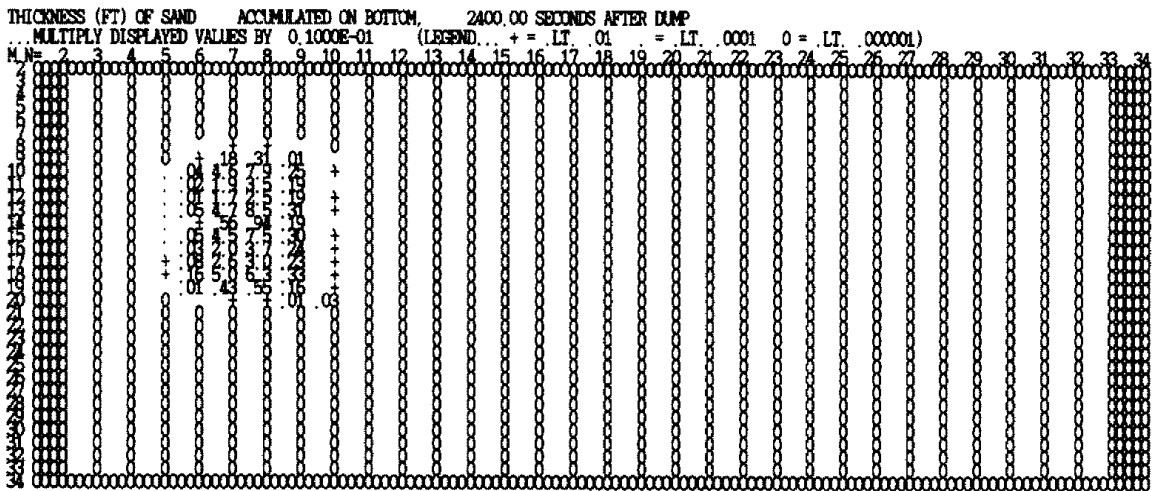
으로 나타났다. 모델에서 선정된 수심이외에도 특별히 설정한 수심별, 시간별 유체의 부피비를 출력토록 하였다. 모래는 투기후 5분이내에 전부 바닥에 퇴적하였으며, 모래의 바닥 퇴적량과 퇴적두께를 도식하면 Fig. 7(a),(b)와 같다. 다른 물질에 비해 상대적으로 비중이 크고 침강속도가 높아 유속의 영향을 적게 받고, 다만 준설선의 이동속도에 의해 투기지점에서 x축의 양의 방향으로 퇴적하는

양상을 나타냈다. 전체 퇴적면적은  $0.15 \text{ km}^2$  정도이며, 격자당 최대 퇴적체적량은  $34.26 \text{ m}^3$  이며, 최대 퇴적 두께는 2.59cm이다.

Fig. 8는 투기 1시간 후 해저면에 퇴적한 총 물질의 두께를 나타내고 있다. 최대 퇴적높이는 투기점에서 x축의 양의 방향으로 225m 부근에서 8.53cm로 나타났다. 이 지점의 퇴적 체적량 중 87%는 모래가 차지하고 있는 것으로 분석되었다.



(a) Bottom Accumulation



(b) Thickness of Sand accumulated on bottom

Fig. 7 Sand distribution

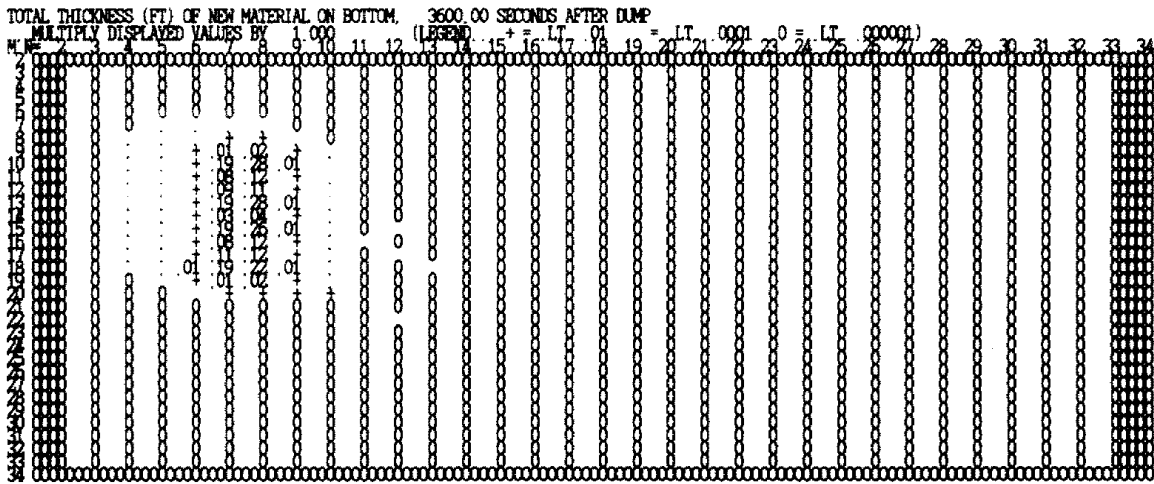


Fig. 8 Total thickness of new material on bottom after 1 hour

### 6. 결 론

이상으로 호퍼준설선에서 해역에 투기한 준설토의 거동특성을 수치모델을 통해 분석하기로 하고 모델 수행 해역에 대한 이의 결과를 시간적 공간적으로 나타내어 보았다. 호퍼선에서 투기물질의 거동은 주로 수중에서의 지체시간, 유동 및 성층상태에 의해 영향을 받음을 알았다. 수평방향의 확산은 수평방향의 유속, 확산계수의 선택 및 투기물질의 거동특성에 밀접한 관계가 있었다. 실제 투기문제에서는 기존의 주변농도와 해양투기후의 농도와의 관계에 의해 투기장 해역에 미치는 영향이 주된 관심사가 된다.

비교적 가늘고 작은 등급의 입자들이 더미내에 잔류하려는 경향을 가져 이류하강의 단계가 연장하게 되지만 수심의 제약 및 주변수의 성층에 의해 해저에서 붕괴하여 퇴적하거나, 부력중립수심에서 붕괴하여 수동확산단계로 전이된다. 반면, 큰 등급의 물질은 투기후 짧은 시간내에 해저면에 퇴적하였으나, 여전히 투기 준설선의 이동 및 유속의 영향을 받아 투기지점 부근에서 편향되어 퇴적하는 것으로 나타났다.

이전의 연구(정 등, 1995)에서 연구된 바와 같이 준설토의 대부분은 오염되어 있고 특히, 환경준설이나 유지준설에 의해 발생하는 투기물질은 그 오

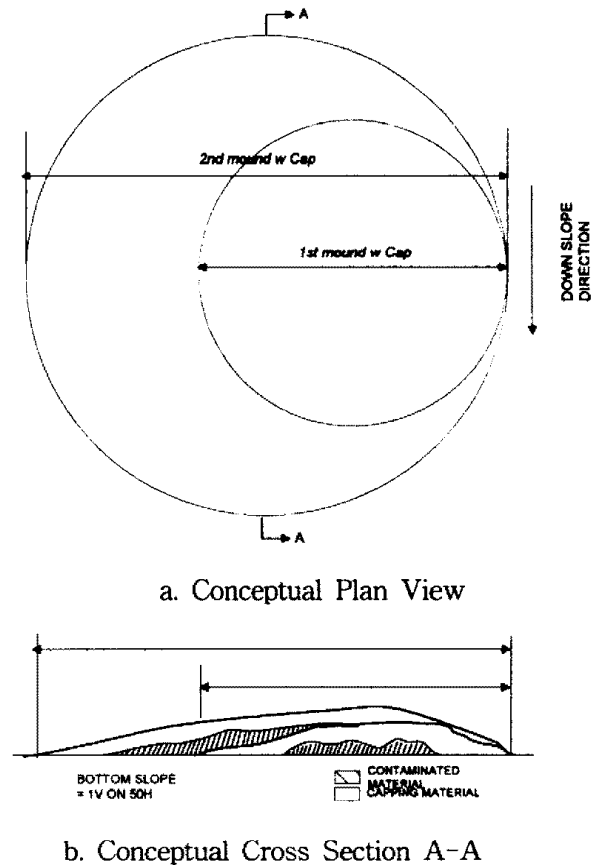


Fig. 9 Schematic diagram of the final disposal mound configuration

염정도가 심각하여, 투기물질 유출 및 2차오염방지

가 요구된다. 이의 해결방법중 하나가 Fig.9에 도시된 것 같은 복토법(Capping)이다. 그림에서는 2차에 걸쳐 투기와 복토가 이루어진 양상을 나타낸다. 이를 위해서는 준설토의 특성과 투기장의 특성을 면밀히 파악하고, 모델시험 및 현장측정에 의해 투기작업별 투기장에서의 퇴적형태를 사전에 분석 예측하여 최적의 준설 및 투기작업을 선택하여야 할 것이다.

본 연구에서는 기존의 준설물질의 해양투기로 인한 거동특성을 규명하는 것 외에도 투기물질의 재부유, 이동 및 확산을 막기위한 복토공법을 도입 시 이에따른 Cap의 이동패턴을 파악하는데 기여할 것으로 본다.

본 연구와 관련한 앞으로의 과제는 특정해역에서 조류와 같은 흐름특성을 시간적으로 도입하여 실제해역에서 준설토의 투기문제에 적용하는 문제를 들 수 있다.

### 참고문헌

- 1) 강원대 산업기술연구소, "가덕신항만 준설매립 지반의 침강압밀에 관한 연구 보고서", 1996.
- 2) 정대득, 김지연, 신승호, 이중우, "연안수역에서 투기준설토의 초기거동에 관한 연구", 한국항만학회지 제9권, 제1호, 1995.:
- 3) 해양수산부, "부산신항개발사업 폐기물 해양배출 조사평가 보고서", 1997.
- 4) Brandsm, M. G. and Divoky, D. J. (1976), "Development of models for short-term fate of dredged material discharged in the estuarine environment," Contract Report D-76-5, Prepared under Contract No. DACW39-74-c-0075 by Tetra Tech, Inc., Pasadena, Calif., for the US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- 5) Koh, R. C. Y. and Chang, Y. C. (1973), "Mathematical model for barged ocean disposal of water," Environmental Protection Technology Series EPA 660/2-73-029, USEPA, WADC.
- 6) Kuo, A.Y., Welch, C.S. and Lukens, R.J., "Dredged induced turbidity plume model," J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.111, No.3, 1985, pp. 476~494.
- 7) Male, J.W. and Cullinane, Jr., M.J., "Procedure for Managing Contaminated dredged material," J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.114, No.5. 1988a, pp. 545~564.
- 8) Male, J.W., Cullinane, Jr. M.J., and phillips, K., "Managing Contaminated dredged material : Application," J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.114, NO. 5, 1988b, pp. 565~581.
- 9) Paul L. Bishop, Ph. D. , " Marine pollution and its control", pp.274~296
- 10) Per Brum(1990), " Port engineering", 4th ed., Vol. 2, Gulf Publishing Co., Houston, pp.930~1134
- 11) 横山長之・北林興二, 足立芳寛, 環境アセスメント手法入門, オーム社, 1980, pp. 119 ~122.