

## 제한투기시설에서 배출되는 여수의 근역거동

정 대 득\*·이 중 우\*\*

### The Near-field Behavior of Effluent discharged from Confined Disposal Facility

D. D. Jeong · J. W. Lee

**Key Words :** 제한투기시설(Confined Dumping Facility), 근역거동(Near-field Beahvior),  
준설토(Dredging Material), 투기(Dumping)

## Abstract

The primary purpose of dredging work is to maintain navigational readiness and to increase environmental amenity, so that the dredging project which is composed of excavating, removing, transporting, storing and disposing dredged material must be carefully managed to insure that dredging works are completed in a cost-effective and environmentally safe manner. The most important point in dumping operations is an estimating and reducing the impacts of discharges at the dumping area. One of the most effective method for the reduction of ecological impacts at dumping area is using the schematic process composed of the sophisticated plan, precise work and predicting /reducing the impacts based on the numerical model and field observation.

In this study, the numerical model is used to predict the near-field spatial fate and behavior of effluent discharged from Confined Dumping Facility(CDF) located near coastal area. To to this purpose, reappearing of tidal current was preceded . The model is then applied to Mokpo harbor, where capital dredging and maintenance dredging are conducted simultaneously and the CDF is under construction. In the series of model case study, we found that the near-field behavior of effluent discharged from CDF was governed by the receiving water condition, outfall geometry, characteristics of effluent and CDF operating conditions.

## 1. 서 론

준설토 처리법은 환경측면에서 수용가능성, 기술적  
실행가능성 및 경제성이 균형있게 고려되어 선택되어  
야 하며 그 범주는 개방수역투기, 제한영역투기, 유효  
이용법으로 구분할 수 있다. 우리나라에서는 준설토의  
대부분을 매립용 토사로 활용되고 있으며, 특히 항만  
개발과 연관된 즉, 개발준설의 경우에는 더욱 그러하

\* 정희원, 목포해양대학교 해상운송시스템학부, 교수

\*\* 정희원, 한국해양대학교 토목환경공학부 교수

다. 준설토 처리법은 이러한 다양한 조건들이 고려되어 선택되어야 하지만, 우리나라에서는 최근에 이루어지고 있는 대형항만개발과정에서도 준설토의 평가, 거동 및 이로 인한 영향을 저감하는 방안 등을 정확히 고려하고 있지 못하는 상황이다. 최근 일부대형 항만 개발 공사에서 대부분의 준설토를 매립재로 이용하고 개발과정에서 외해투기가 불가피한 준설토를 대양에 투기할 때 거동을 파악한 정도이다. 그러나 매립과정 특히, 제한된 육상이나 연안 투기장에서의 준설토의 거동 및 시공 중 발생하는 여과수에 대한 평가는 전혀 고려되고 있지 못하는 상황이며, 이에 관한 관련법규도 거의 마련되지 못한 상태이다.

본 논문에서는 준설토 처리과정에서 주변환경에 미치는 영향을 파악하기 위해 제한투기시설에서 배출되는 여수의 초기거동을 해석하였다. 이를 위해 기초자료가 되는 주변해역의 유동 재현은 ADI법을 이용한 수치시뮬레이션으로 수행하였으며, 제한투기시설에서 배출된 준설토의 초기거동은 부(-)표면부양성배출로 가정할 수 있으므로 표면부양성유출을 해석하기 위해 USACE에서 개발한 ADDAMS 모델을 활용하여 분석하였다. 이 연구는 준설토 처리법 중 우리나라에서 가장 많이 이용되고 있는 제한투기시설 투기법에서 발생할 수 있는 문제점 파악, 최적처리방안을 모색 및 준설토의 장기거동 해석에 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 준설 및 준설토 처리현황

항만이나 연안수역의 퇴적물은 하천으로부터 직접 유입되거나 해안침식에 의해 유입되기도 하며 만내 순환형태에 따라 특정 해역의 수저에 편중되어 발생한다. 상류하천의 개발이 진행되면 침식이 증가하고 결과적으로 하천이나 항만, 하구의 침니화가 초래된다. 이로 인한 퇴적량의 증가와 대형화되어가는 선박의 항행체계를 유지하기 위해 항만과 수로의 수심을 증가하기 위한 준설작업이 요구된다. Table 1은 최근 국내 주요항만에서 행해진 준설작업의 연도별 통계량으로 총 준설량의 변화를 살펴보면 약간의 차이는 있

으나 매년 준설량 및 준설면적이 모두 지속적으로 신장하고 있음을 알 수 있다. 이는 항만 개발을 위한 준설뿐만 아니라 대형화 되어가는 선박의 효율적 입·출항을 도모하여 항만의 기능 유지를 위해 많은 양의 준설이 행해지고 있다는 것을 알 수 있다.

Table 2 Total of dredging work per year of major ports (Korea)

Year	No.	Volume( $m^3$ )	Area( $m^2$ )
1985	28	834,520	516,479
1986	40	940,794	654,615
1987	29	1,442,752	789,520
1988	30	1,888,623	914,049
1989	27	1,889,400	1,173,639
1990	23	2,623,117	1,348,813
1991	38	1,541,550	1,065,260
1992	31	3,186,067	1,221,352
1993	31	7,120,127	2,403,410
1994	41	7,673,708	2,459,049
1995	25	4,452,726	1,603,926
1996	21	3,761,500	728,580
1997	31	3,846,155	1,791,776
1998	33	11,590,763	3,180,523

Source : 해운항만통계년보(1985~1998)

준설물질 처리법을 결정할 때에는 공사의 규모, 준설물의 물리적 특성, 준설물질 내 오염물질량, 이용 가능한 준설장비, 준설장소의 조건, 투기장소의 조건, 잠재적인 환경영향, 경제성, 사회적·정치적·법적 요소 등을 고려해야 한다. 대부분의 준설토 특히, 항만 준설토는 오염물이 많이 포함되어 있으므로 준설 및 처리 과정에서 준설토 성분 분석, 적절한 준설 작업방법과 장비 선택, 운반 및 투기법, 오염물질 처리법, 적절한 투기장소의 선택, 환경에 미치는 영향 등을 명확히 파악하여 준설로 인한 악영향을 최소화해야 한다. 준설토 처리방법을 선택할 때는 환경적 측면과 경제적 측면을 먼저 고려해야하며, 처리방법들을 도식화하면 Fig. 1과 같다.

Table 2는 전세계적으로 준설토를 처리하고 있는

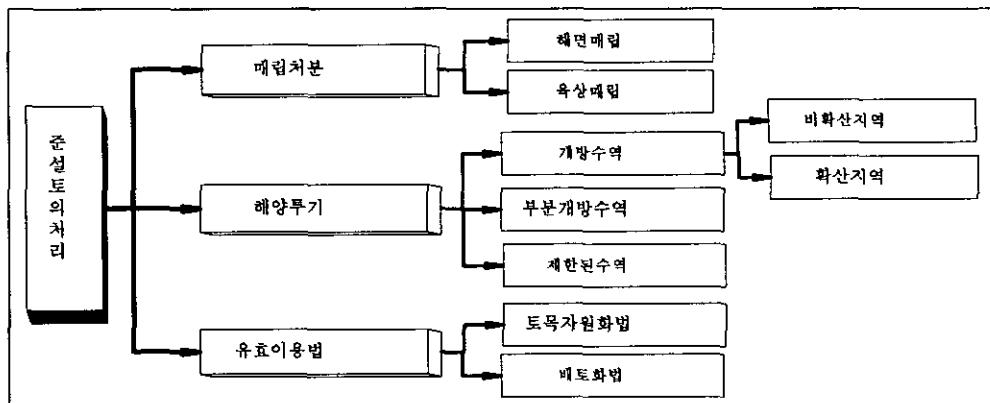


Fig. 1 Disposal alternative

방법을 정리한 것이다. 표에서 나타난바와 같이 준설토의 처리는 60%정도가 해안역 및 해양에 투기되고 있으며 내륙의 저습지를 포함하면 수역에 투기되는 비율은 86%에 육박하게된다.

우리나라의 준설토 처리 사례로는 부산광역시 가덕도 북측 및 전해시 일원의 공유수면에 위치한 부산 신항 개발사업에는 총 준설량 84,306천  $m^3$ 이 예상되며, 이 중 준설토 투기장을 조성하고 매립재로 재활용되는 양은 81,564천  $m^3$ (총 준설토의 96.75%)이며(부산 신항개발사업 폐기물 해양배출 조사평가보고서, 1997). 목포항의 경우 기존항구 정비공사로 인하여 발

생되는 총 준설량과 투기장의 수용량은 각각 5,158천  $m^3$ , 5,203천  $m^3$ 이며, 모든 준설토를 연안투기장에 투기 할 계획이다. 최근에 우리나라에서 시행된 대형 준설 매립공사로는 전라남도 순천시, 여천군 및 광양시 일원의 해면을 매립하여 약 1,275,000  $m^2$ 면적의 단지를 조성한 울촌산단 준설매립공사, 인천항 및 인천시의 장기적인 도시계획과 연계하여 1985년 인천항 광역개발 기본계획, 1992년 수립된 송도 신시가지 조성계획에 의해 인천 내외항의 개발준설과 유지준설량 3,419,000  $m^3$ 을 포함하여 총 187,900,000  $m^3$ 을 매립한 송도 공유수면 준설매립공사, 준설소요량 약

Table 3 Worldwide method of disposal

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 (11)	285,742 (26)	397,182 (37)	248,540 (23)	29,571 (3)	1,079,302 (100)

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

143,201,000  $m^3$ 을 매립하는 인천국제공항 공사 등이 있으며, 1962년부터 1998년까지 준공된 공유수면 매립 공사는 총 3,004건으로 매립면적은 887.9km<sup>2</sup>이다 (Ministry of Maritime Affairs & Fisheries, 1999).

준설토 처리법 중에서 매립처분에 의한 방법에는 별개의 제한투기시설을 축조하여 시행하는 방법과 매립재로 활용하는 방법이 있다. 어느 경우에서든지 준설토의 수송과정에서 제한투기시설에는 여수가 발생하게 되며 이를 처리하는 방법에 따라 투기장의 용량과 유지관리 및 주변환경에 미치는 영향 등이 결정된다. 제한투기시설의 설계 및 운영의 가장 근본적인 목표는 예상되는 준설토를 수용할 수 있는 적절한 저장 용량 제공, 준설작업 중에 토사를 최대한 유지하여 여수에 포함되는 부유물질을 최소화하는 것이다. 이것은 제한투기시설의 효율적인 설계, 운영 및 관리의 상호 작용에 의해 결정된다.

Fig. 2는 제한투기시설의 기본 개념을 나타내고 있다. 준설토에는 특히 최초준설에서 발생하는 준설토의 경우에는 모래, 점토, 자갈 등이 포함되어 있는 경우가 많으며, 조립물질은(>No. 200체) 준설토 유입구 부근에서 급속하게 하강하여 더미를 형성하고 세립물질(<No. 200체)은 대부분 투기장내의 모든 영역에서 침전하며 투기장의 저장용량에 많은 영향을 미친다. 상충수는 일반적으로 제방을 거쳐 투기장으로부터 배출되며 유출량은 대략 유입률과 같다. 효과적인 퇴적작용이 이루어지기 위해서는 투기장 전역의 수심이 제방 천단고의 높이에 의해 제어되는 수심으로 유지되어야 한다. 환경적 측면에서 제한투기시설의 운영은 대부분 유출물의 수질상태 즉 부유토사 및 탁도와 함께 오염물질에 의해 규제되므로 여수 관리가 중요하다.

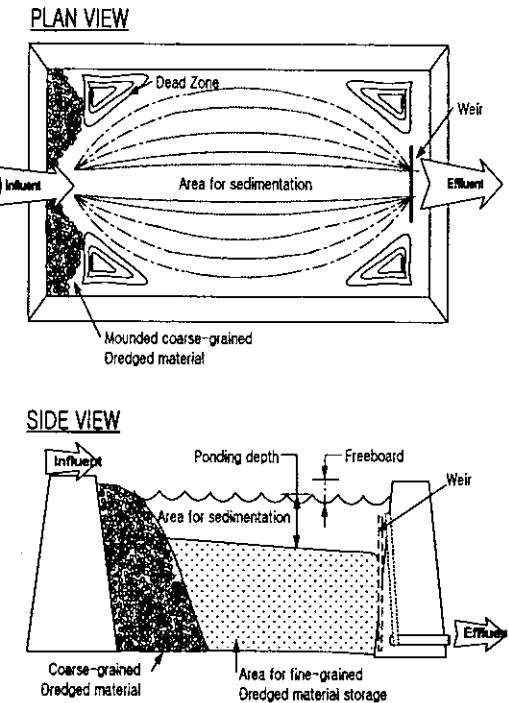


Fig. 2 Schematic view of Confined Disposal Facility

Table 3은 항만시설물설계기준서에 규정된 준설토의 조건에 따른 유실율이다. 유실율은 토질조건 및 준설방법뿐만 아니라 매립 가호안의 축조여부, 여수로의 위치와 높이, 배출구로부터의 거리, 매립면적, 시공관리 등 여러 가지 요인에 의해 달라지지만 투기되는 물질의 상당량이 여수와 같이 유실되는 것으로 나타나 있다. 목포신외항건설공사의 건설 예정지 전면 해역으로 항만공사이후 소요수심확보를 위해 준설되어야 할 해역의 3 지점에서 채취된 시료의 입도분석결과 No. 200 통과율이 거의 100%에 가까운 점토질로 나타났다. 이와 같은 토질구성을 나타내는 준설토는 작업 조건에 따라 상당량 유실될 것으로 사료된다.

Table 4 Retention rates of dredged material in CDF

Classification		Loss rate(%)
Soil classification	Clay & Silty clay	30 이상
	Sandy silt	5-3 $L_g$
	Gravels	0-5
Grain size (mm)	> 1.2	NIL
	1.2-0.6	5-8
	0.6-0.3	10-15
	0.3-0.15	20-27
	0.15-0.075	30-35
	< 0.075	30-100

### 3. 제한투기시설에서 유출된 여수의 균역거동

수역으로 배출되는 유동은 완전제트와 완전플룸으로 구분할 수 있다. 완전제트는 운동량만 포함한 유동이며, 운동량은 포함되지 않고 배출물과 투기수역의 밀도차에 의한 부력에 의해서만 거동하는 유동을 완전플룸이라한다. 대부분의 유동은 완전제트와 완전플룸의 조합으로 이루어지며, 운동량과 부력에 의해 유동의 형상과 거동이 제어되는 부양성제트이다. 제한투기시설에서 배출되는 여수의 거동은 표면에서 배출되는 부(-)부양성 제트로 가정할 수 있으며, 이의 해석에 이용되는 수학모델은 크게 제트적분모델, 3차원수치모델 및 길이비모델이 있다. 본 논문에서는 횡방향 흐름, 수심에 의한 제한 및 원역과정을 모델링하기 용이하며, 경계조건 설정이 간단한 길이비모델을 이용한다.

#### 3.1 길이비모델

길이비모델은 유동의 거동을 몇 개의 영역으로 구분하고, 각각의 영역을 지배하는 초기운동량, 부력플럭스, 배출수역의 횡방향흐름과 같은 특정한 특성에 의해 각 영역에서의 유동을 차원해석에 의한 점근식으로 근사화하는 모델이다. 이 점근식은 가장 중요한 특성만을 나타내도록 단순화된 문제를 표현하는 기본

방정식으로부터 유도되며, 영향이 적은 특성은 접동항으로 나타낸다. 이러한 각각의 해석적 표현이 유효한 영역의 범위를 나타내기 위해 길이비를 이용하게 된다. 길이비는 배출체적플럭스  $Q_0 = a_0 u_0$ , 운동량 플럭스  $M_0 = u_0 Q_0$ , 부력 플럭스  $J_0 = g_0 Q_0$ , 횡방향흐름  $u_a$ ,으로 정의되며 이들 물리량에 의해 지배되는 유동 구간을 구분한다. 여기서  $a_0$ 는 배출단면적,  $u_0$ 는 배출속도,  $g_0$ 는 초기감쇄중력가속도로  $g(\rho_a - \rho_0)/\rho_a$ 로 정의되며,  $\rho_a$ 는 주변밀도,  $\rho_0$ 는 배출물의 초기밀도이다. 표면부양성제트 해석에는 배출 길이비  $L_Q$ , 제트-플룸 길이비  $L_M$ , 제트-횡방향흐름 길이비  $L_m$ 와 플룸-횡방향흐름 길이비가 이용되며, 이를 정리하면 Table 4와 같다.

Table 5 Length-scales used to analyze buoyant surface jet

$L_Q = \frac{Q_0}{M_0^{1/2}}$	= discharge(geometric) scale
$L_M = \frac{M_0^{3/4}}{J_0^{1/2}}$	= jet/plume transition scale
$L_m = \frac{M_0^{1/2}}{u_a}$	= jet/crossflow scale
$L_b = \frac{J_0}{u_a^3}$	= plume/crossflow scale

배출길이비는 배출체적 플럭스와 운동량 플럭스의 상대적인 크기이며, 제트가 배출구에서 흐름형성영역으로 배출되는 초기에 배출구의 형상에 의해 거동이 지배되는 영역의 범위를 나타낸다. 제트의 궤적 중심선 상의 거리  $s$ 와 길이비의 비교에 의해 즉,  $s/L_Q \ll O(1)$ 인 영역에서는 배출원의 형상이 유동의 거동에 영향을 미치며,  $s/L_Q \gg O(1)$ 인 영역에서는 배출원의 형상보다는 운동량이나 부력에 의해 유동이 지배된다. 제트-플룸길이비는 운동량과 부력의 상대적인 크기이며, 정체수역에서 부양성제트의 운동량이 지배적인 유동에서 부력이 지배적인 유동까지의 범위

를 나타낸다.  $s/L_M \ll O(1)$ 인 영역에서는 유동의 거동이 운동량에 의해 지배되고,  $s/L_M \gg O(1)$ 인 영역에서는 부력에 의해 지배되어 측면 퍼짐이 많이 발생한다. 따라서 제트-풀룸 길이비는 제트 혼합 특성을 가지는 영역이 끝나고 부력에 의한 측면 퍼짐이 시작되는 지점을 구분하는 중요한 기준이 된다. 제트-횡방향흐름 길이비는 초기운동량과 주변횡방향흐름 속도의 상대적인 중요도를 나타내는 것으로 배출물의 유동이 약편향 영역에서 강편향 흐름으로 변화하는 지점을 나타낸다.  $s/L_m \ll O(1)$ 인 영역에서는 제트의 초기운동량이 가장 중요하고 그 다음으로 영향을 미치는 것이 횡방향흐름이며,  $s/L_m \gg O(1)$ 인 영역에서는 횡방향흐름이 제트의 거동에 큰 영향력을 가진다. 풀룸/횡방향흐름 길이비는 완전풀룸유동에서 횡방향흐름에 대한 부력의 상대적인 크기이며,  $s/L_b \ll O(1)$ 인 영역에서는 제트의 초기부력이 지배적이고,  $s/L_b \gg O(1)$ 인 영역에서는 횡방향흐름이 풀룸의 거동에 강한 영향을 미친다.

### 3.2 지배방정식

부양성제트의 거동은 근역과 원역으로 구분하여 해석하는 것이 용이하다. 근역은 배출점 부근의 영역으로 배출물과 주변수의 혼합은 주로 배출조건 즉, 배출물의 초기체적, 운동량과 부력 풀릭스에 의해 결정된다. 원역에서의 혼합은 주변조건 즉, 주변난류, 성층, 풍성전단력과 같은 인자들에 의해 혼합률이 결정된다. 표면부양성제트의 근역에서의 거동은 정체수역에서는 강한 제트혼합을 하며, 횡방향흐름이 존재하는 배출수역에서의 거동특성을 완전제트, 벽면제트, 해안선부착 유동, 상류침투풀룸으로 구분할 수 있다.

Fig. 3는 정체수역에서의 표면부양성제트를 나타내고 있다. 거의 편향되지 않은 부양성제트영역에서는 측면방향 및 수직방향 연행이 발생하여 제트의 폭 및 두께가 증가한다. 부양성제트영역의 종점 즉 근역혼합이 중요하고 원역이 시작되면 원형데미리를 형성하여 모든 방향으로 비정상상태로 퍼져나간다.

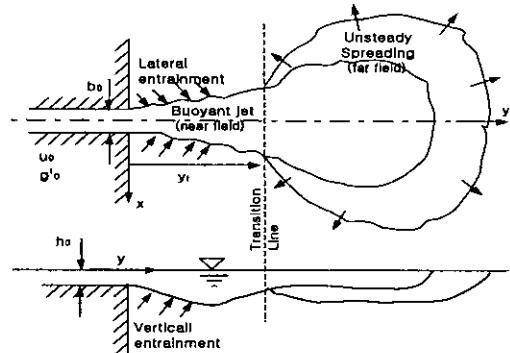


Fig. 3 Typical buoyant surface jet in a stagnant environment

$y/L_M \ll O(1)$ 이면 유동은 초기운동량에 의해 지배되며 따라서 강한 제트형 혼합이 이루어지고,  $y/L_M \gg O(1)$ 이면 유동은 부력에 의해 지배되며 측면 풀룸형 퍼짐이 많이 일어난다.  $L_M \ll L_Q$ 인 경우에는 운동량에 의해 지배되는 영역은 나타나지 않으며 유동은 완전히 풀룸형이 된다.

이 경우 주변유속  $u_a$ , 수심  $H$ , 배출각도  $\sigma$ 이 무시되어 차원식은 다음과 같이 단순화된다.

$$\phi = f(Q_0, M_0, J_0, s, h_0, b_0) \quad (1)$$

강한 제트형 혼합에 의해 지배되는 초기영역에서는 초기 흐름형성영역 이후에는 수평방향에서는 완전한 가우스 속도분포를, 수직방향에서는 반 가우스 속도분포를 나타내며 오염물질의 농도도 유사한 형태로 나타나는 것으로 한다. 중심선상 속도  $u_c$ 는 중선선 상에서의 거리  $s$ 가 증가하면 감소하지만 총 운동량 풀릭스는 보존된다.

차원해석을 통해  $u_c$ 는 초기운동량  $M_0$ 와 궤적 중심선 상에서의 거리  $s$ 의 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$u_c = c_1 \frac{M_0^{1/2}}{s} \quad (2)$$

제트의 반폭은 차원해석을 통해 다음과 같이 구해진다.

$$b = b_1 s \quad (3)$$

만약 중심선상에서의 희석값  $S$ 를 초기배출농도  $c_0$ 와 중심선상에서의 농도  $c$ 로  $c_0/c$ 로 정의한다면, 차원해석에 의한 다음과 같이 정의된다.

$$S = s_i \frac{M_0^{1/2}}{Q_0} s = s_i \frac{s}{L_Q} \quad (4)$$

상수  $c_1$ ,  $b_1$ ,  $s_i$ 는 실험에 의해 결정된다.

이어지는 부양성퍼짐 영역에서도 초기운동량이 계속 유지되면, 식(2)로 주어지는 중심선 속도 관계식은 유효하다. 그러나 수직방향으로 작용하는 부력이 유동에 작용하여 수평방향으로는 퍼짐을 유발하고 수직방향으로는 얇아지게 된다. 이 부양성퍼짐 과정은 제트형 중심선 속도에 부과되는 섭동으로 간주할 수 있다. 부양성퍼짐은 플룸이 밀도류처럼 거동하는 것으로 가정한다. 밀도류는 일반적으로 플룸의 가장자리에서 주변유체를 연행하며,  $v_B$ 의 속도로 측면으로 퍼진다.

$$v_B = \left( \frac{g b_v}{C_D} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$C_D$ 는 항력계수이며 값의 범위는 0.5~2.0이다 (Doneker and Jirka, 1990). 밀도류는 모자형 속도 형상을 가지는 것으로 모델링한다.

유선 상에서의 퍼짐속도를  $v_B = u_c (db_h/ds)$ 로 정의할 수 있으므로, 이 식을 식(6)에 대입하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\left( \frac{db_h}{ds} \right) = \frac{1}{u_c} \left( \frac{g b_v}{C_D} \right)^{1/2} \quad (6)$$

부력 플럭스는 항등식  $J_0 = 2u_c g b_v b_h$ 과 같이 보존되기 때문에 식(6)에  $g' = J_0/(2u_c b_v b_h)$ 를 대입하고, 완전제트에 대해 중심선에서의 속도 관계식 식(2)를 식(6)에 대입하면 다음과 같은 식이 구해진다.

$$b_h^{1/2} \frac{db_h}{ds} = b_1 b_h^{1/2} + c_1 \left( \frac{1}{2C_D} \right)^{1/2} \frac{J_0^{1/2}}{M_0^{3/4}} s^{3/2} \quad (7)$$

비부양성 거동에 근거한 섭동해석에 의해 최종적인 수평방향 퍼짐 관계식은 다음과 같이 구해진다

$$b_h = \left( (b_{hi}s)^{3/2} + b_{bi} \left( \frac{1}{2C_D} \right)^{1/2} \frac{1}{L_M} (s - s_i)^{5/2} \right)^{3/2} \quad (8)$$

여기서  $b_{hi}$ 와  $s_i$ 는 각각 이 영역이 시작되는 점에서 반폭과 궤적 상의 거리이고,  $b_{bi}$ 는 상수이다.

연행관계식  $q_e(s) = \beta v_B b_v$ 을 이용하면 플룸의 수직방향 깊이를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b_v = b_{vi} \left( \frac{b_h}{b_{hi}} \right)^{\beta-1} \quad (9)$$

여기서  $b_{vi}$ 는 해당영역 시작점에서의 초기 값이며,  $\beta$ 는 상수로 값의 범위는 0.15~0.25이다. 제트의 전면부에서 이루어지는 혼합 때문에 국지농도  $C$ , 국지 부력  $g'$ 는 거리  $x$ 에 따라 점진적으로 변화하므로  $c_0/c$ 로 주어지는 용적희석  $S$ 는  $g_0/g'$ 와 같다. 부력플럭스와 오염물질 플럭스가 보존되기 때문에 항등식  $u_a g' b_v b_h = constant$ 을 초기조건과 결합하여 다음과 같이 희석을 표현할 수 있다.

$$S = S_i \left( \frac{b_h}{b_{hi}} \right)^\beta \quad (10)$$

여기서  $S_i$ 는 초기 희석이다.

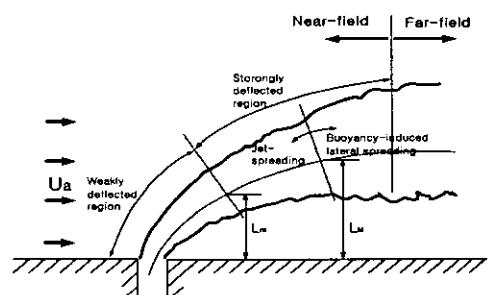


Fig. 4 Buoyant surface free jet

Fig. 4는 횡방향흐름이 존재하는 수역으로 배출되는 완전제트로 주변운동량을 연행하여 제트가 점차적으로 굽어지게되며, 제트의 거동을 약편향 영역과 강편향 영역으로 구분할 수 있다. 각 영역의 구분은 제트-횡방향 길이비  $L_m$ 에 의해 이루어진다.  $y/L_m \ll O(1)$ 이면 횡방향흐름의 영향이 적은 약편향 영역이며,  $y/L_m \gg O(1)$ 이면 횡방향흐름에 의해 이류되는 강편향 영역이 된다. 약편향 영역에서는 제트형 혼합이 강하고 하류축으로 이류는 적게 일어난다. 강편향 영역에서는 배출물이 주변흐름에 의해 하류 축으로 이류된다. 그러나 배출물을 주변흐름의 횡방향으로 이동시키는 수평방향 운동량은 여전히 유지된다. 주변흐름이 존재하지 않은 정체수역에서는 약편향 영역만 존재한다.

횡방향흐름이 존재하는 곳에서 약편향제트는 정체환경에서 제트형 혼합영역에 대해 유도된 중심선 상 속도, 반폭 및 회석 관계식을 적용할 수 있다. 그러나 횡방향흐름에 의한 하류 축으로의 이류를 감안하기 위해 다음과 같은 섭동항이 포함된다.

$$\frac{u_c}{u_a} = \frac{dy}{dx} \quad (11)$$

이 식에 중심선상 속도를 나타내는 식(2)를 대입하여 적분하면 다음과 같은 캐적 관계식이 구해진다.

$$\frac{y}{L_m} = t_1 \left( \frac{x}{L_m} \right)^{1/2} \quad (12)$$

여기서  $t_1$ 은 상수이다.

강편향유동은 주변흐름과 같이  $u_a$ 의 속도로 하류 축으로 이류한다. 그러나 여전히 잔류하고 있는 운동량에 의해 측면으로도 이동한다. 강편향된 유동을 선형 배출원에서 방출되는 비부양성 액체의 순간방출로 모델링할 수 있다. 이 개념은 선형 충격량  $M$ , 수평방향 진행거리  $y$ , 방출 후 경과시간  $t$ 를 주요 변수로 하는 차원해석에 의해 다

음과 같은 결과식을 유도할 수 있다.

$$\frac{M't}{y^3} = const. \quad (13)$$

완전제트에 적용하는 경우에는  $M'$ 은  $M_0/u_a$ 으로,  $t$ 는  $y/u_a$ 으로 치환되어 다음과 같은 차원이 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{y}{L_m} = t_2 \left( \frac{x}{L_m} \right)^{1/3} \quad (14)$$

여기서  $t_2$ 는 상수이다.

제트의 반폭식은 부양성 증가인자를 포함하고 있는데 이 인자는 식(8)에서와 유사한 방법으로 유도된다.

$$b = b_2 y \left( 1 + b_{k2} \frac{L_b^{1/2}}{L_m^2} (y - y_i)^{3/2} \right) \quad (15)$$

질량보존항등식  $c_0 Q_0 \propto c_c b_h B_v u_a$ 을 사용한다면, 회석  $S = c_0/c_c$ 을 길이비를 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = S_2 \left( \frac{y^2}{L_m L_Q} \right) \quad (16)$$

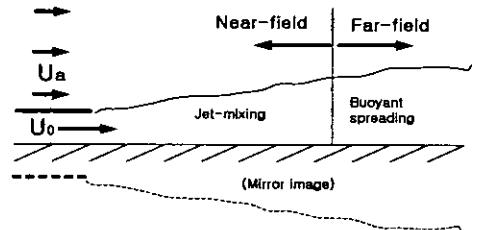


Fig. 5 Typical wall jet

Fig. 5는 벽면제트를 나타내며, 이것은 약편향 완전제트의 특수한 경우로 고려할 수 있다. 벽면 제트의 대칭형상을 고려하면 이 유동은 같은 방향의 흐름이 있는 수역에서 완전제트와 같다. 그러나 배출이 같은 방향 흐름으로 이루어졌기 때문에 강편향 영역은 나타나지 않으며 부력에 의한 퍼짐은 원역과정으로 고려할 수 있다.

대칭형상을 감안하고 약편향 완전제트의 항등식을 이용하면 다음과 같은 회석식을 구할 수 있다.

$$S = s_3 \left( \frac{x}{L_Q} \right) \quad (17)$$

여기서  $s_3$ 는 상수이다.

수평방향 반폭관계식은 다음과 같다.

$$b_h = b_3 x \quad (18)$$

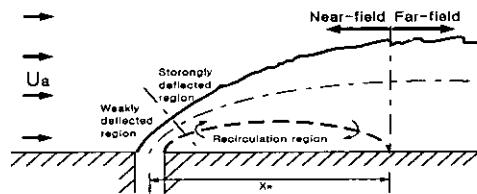


Fig. 6 Shoreline attached flow

여기서  $b_3$ 는 상수이다.

Fig. 6은 해안선부착제트를 나타내며, 배출물이 제방 하류측에 활발하게 부착하는 경우로 강한 주변흐름에 의해 제트가 굴곡되는 경우와 배출수역의 전체 수심에 걸쳐 배출이 이루어져 주변흐름이 완전히 차단될 때 발생한다. 해안선부착제트의 특성은 제트의 후면에서 발생하는 와류에 의해 제방 하류 측에 배출물의 재순환이 발생한다는 것이다. 완전제트에서와 같이 약편향 해안선부착제트영역과 강편향 해안선부착제트/플룸 영역으로 구분할 수 있다. 약편향 해안선부착영역에서는 초기에 굴곡이 크게 발생하여 영역의 길이가 매우 짧아지기 때문에 부력에 지배되지 않는다. 그러나 강편향 영역에서는 부력에 의한 측면 퍼짐을 발생할 수 있다. 해안선 부착이 발생하면 제트의 횡방향 진행이 억제된다.

해안선부착제트의 궤적은 완전제트와 유사하기 때문에 아래와 같은 유사한 궤적 관계식을 약편향 영역과 강편향 영역에 각각 사용할 수 있다.

$$\frac{y}{L_m} = t_3 \left( \frac{x}{L_m} \right)^{1/2} \quad (19)$$

$$\frac{y}{L_m} = t_4 \left( \frac{x}{L_m} \right)^{1/3} \quad (20)$$

여기서  $t_3$ 과  $t_4$ 는 상수이며, 일반적으로 완전제트에서 보다 작은 값이며 부착인자에 의해 결정된다. 회석과 반폭 관계식은 완전제트인 경우와

동일하다. 그러나 회석 상수는 하류 측 제방에서의 유출물 재순환 때문에 작은 값이다.

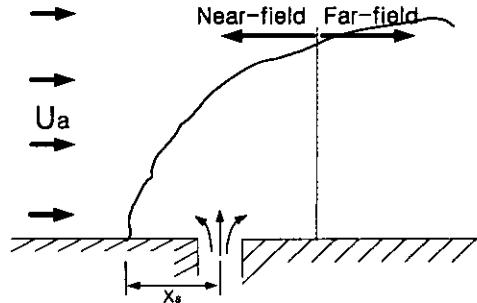


Fig. 7 Upstream intruding plume

Fig. 7은 상류침투풀룸으로 이 형태는 부양성이 강한 배출물이 주변흐름이 약한 수역에 배출되는 경우에 발생한다. 제방 상류쪽으로 플룸의 침투거리는  $x_s$ 로 정의한다. 근역의 범위는 배출지점에서 하류측으로  $x_s$ 까지로 한정한다. 배출지점의 수심이 얕고 배출물이 충분한 운동량과 부력을 가지고 있다면, 유동은 비정상류가 되고 재순환에 의한 완전한 수직혼합이 배출지점 바로 근방에서 이루어질 수 있다.

침투길이비  $L_I$ 을 이용하여 부양성퍼짐력과 주변횡방향흐름사이의 상호작용을 나타낸다(Jones et al, 1985).

$$L_I = \frac{J_0}{\pi C_{D1} u_a^3} = \frac{L_b}{\pi C_{D1}} \quad (21)$$

여기서  $C_{D1}$ 는 항력계수이다.

상류침투길이  $x_s$ 와  $x = x_s$ 에서의 회석식은 다음과 같이 근사된다(Jones et al, 1985).

$$\frac{x_s}{L_I} = 3.77 \left( \frac{L_M}{L_I} \right)^{2/3} \frac{L_M}{L_I} \geq 0.356 \quad (22)$$

$$\frac{x_s}{L_I} = 1.9, \quad \frac{L_M}{L_I} < 0.356 \quad \text{일 때} \quad (23)$$

$$S = \frac{0.81}{(\pi C_{D1})^{1/3}} \frac{L_M^{2/3}}{L_Q} L_b^{1/3} \quad (24)$$

배출지점에서 플룸의 폭  $b_h$ 는 근사적으로 상류침투길이의 2.6배 정도이며, 근역의 끝점에서 플

룸의 폭은 대략  $4.0x_s$  정도이다(Jones et al., 1985)..

$$b_{h,x=0} = 2.6x_s \quad (25)$$

$$b_h = 4.0x_s \quad (26)$$

#### 4. 모델실험 및 결과분석

##### 4.1 모델의 구성

제한투기시설에서 배출되는 여수의 초기거동 모델을 목포항에 적용한다. 준설토의 거동해석에 요구되는 해역의 유동장 재현을 위해 준설공사의 시행목적인 수역내 수심의 변화와 준설에 수반되는 목포남항 준설토 투기장과 2011년 완공계획하에 건설 중인 목포신외항이 건설이 완료되었을 때의 조건으로 유동장 모델을 수행하였으며, 장파근사에 근거한 평면2차원 유체지배방정식을 적용한다. 해수유동계산은 평면2차원 단층모델을 ADI(Alternation Direction Implicit)법에 의해 계산한다

표면부양성체트의 근역과정에서 제한투기시설로부터 배출되는 유출물에 포함된 운동량과 배출 수역과의 밀도차에 의한 부력에 의한 거동 특성을 목포신외항 건설공사의 호안 내측 매립공사시 배출되는 유출수에 대해 적용한다. 여수토의 배출량은 목포남항 준설토 투기장의 여수토 설계 결과의 월류량/유역면적과 방류량/여수토율을 참조하여  $19.61\text{ m}^3/\text{sec}$ 으로 적용하였으며, 유출량에 따른 유출물의 거동특성을 파악하기 위해 매립지역에 단일 여수토가 설치된 경우 즉, 최대 유량과 5개의

유수토가 설치되어 분산되어 배출되는 경우 즉, 최소 유량에 대해 검토하였다. 배출물질의 농도는 목포남항준설토 투기장의 공사단위별 SS발생량 산정량을 근거로 하여  $379\text{ kg/hr}$ 을 적용하여, 저감후의 배출물질의 농도로  $12.64\text{ g/m}^3$ 을 적용한다. 유출물의 배출은 배출점 부근에서 최대 창조류 및 최대 낙조류의 상황에서 시행하였으며, 주변유속의 영향을 고려하기 위해 각각의 최대 유속의 대략 50%의 유속이 있는 경우에서도 행하였다. 해수밀도분포는 해면(1.001)에서 해저면(1.024)으로 성층된 것으로 하여 모델을 설정하였다. 배출 유속  $U_0$ 은 유압식 준설작업선의 통상적인 배출유량  $19.61\text{ m}^3/\text{sec}$ 과 목포남항 준설토 투기장의 여수토 검토결과에 근거하여  $4.8\text{ m/sec}$ 을 적용하였고, 배출지점의 수심  $H_D$ 는 항만시설의 전면에 예상수심  $13\text{ m}$ 로 적용하였으며, 배출수로의 폭  $b_0$ 는 목포남항 준설토 투기장 A, B, C구역의 여수토폭을 참조하여  $5\text{ m}$ 로 하였다. 배출지점 저면에서 바닥 경사  $\theta$ 는 배출지점의 수심과 전면수역의 평균 수심의 값에 근거하여  $5^\circ$ 을 적용하였다. 여수구의 위치는 매립호안 전면에 일괄배치하는 경우와 두 영역으로 나누어 창조 및 낙조의 유향에 따라 준설토의 토출구가 조정되는 경우로 하였다.

##### 4.2 모델실험 결과분석

Fig. 9와 Fig. 10은 모델 적용 해역에서 신항만 건설과 준설토 투기장 조성 등이 완료되었을 때의 계산된 최대 창조류와 최대 낙조류의 유동장이다. 신항만 건설과 투기장 조성이후에는 고하도 전면

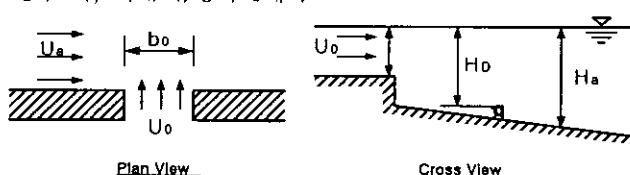


Fig. 8 Schematic View of Discharging from CDF

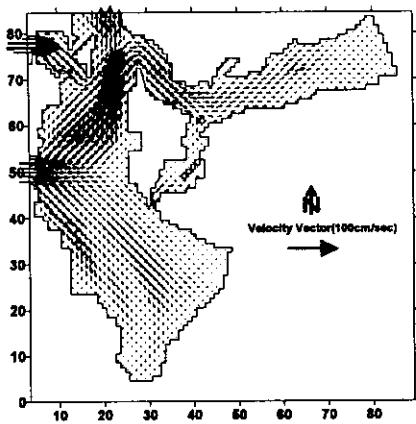


Fig. 4.9 Computed max. flood flow after developing harbor

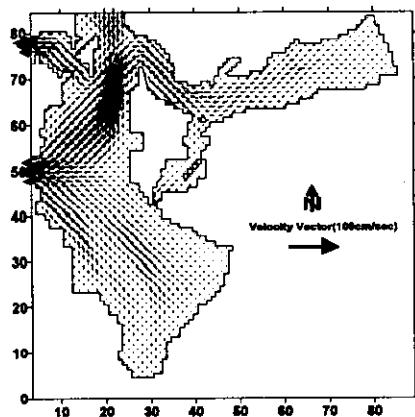


Fig. 4.10 Computed max. ebb flow after developing harbor

해역의 유속이 증가하는 것으로 나타났으며, 낙조 우세의 조석형태를 나타내는 목포항의 조석특성을 잘 나타내고 있다.

유출물의 농도변화를 나타내기 위해 배출농도에 대한 지점별 유출물의 중심선상에서의 회석값을 지점별로 나타내었으며, 유출물의 규모를 나타내기 위해 각 지점에서 제트 궤적의 중심선 상의 농도의  $1/e$  즉, 중심선 농도의 37%인 영역을 플로팅하였다.

Fig. 11과 12는 각 단일 유수토에서 유출되는 준설토 투기장의 여수 거동을 최대 창조류인 경우와 최대 창조류의 50% 유속에서의 거동 특성을

나타내고 있다. 최대 창조류 환경에서는 약편향 영역이 주변유속의 흐름방향으로 100M 가량 지속된 이후에 강편향으로 천이 되었다. 최대 창조류의 50%의 유속에서는 배출운동량의 영향으로 150M 가량 약편향 영향이 지속되다가 주변유속방향으로 150M 이동한 후 강편향되었다. 어느 경우에나 강편향이 시작되는 지점까지 이동하면서 주변 유체를 연행하여 6.3~7.0의 회석도를 나타냈으며 강편향 영역이 중요하고 원역과정이 시작하는 각각 500와 700M 부근 지점에서 회석도는 8이상인 것으로 나타났다.

Fig. 13과 14는 여구토가 5개 설치되어 배출유량이 감소한 상황에서 각각 최대 창조류와 최대 창조류의 50% 유속에서의 거동 특성을 나타내고 있다. 배출유량의 감소로 배출 운동량의 감소되어 최대 창조류에서는 20M 이내에서 강편향되었으며, 최대 창조류의 50%인 경우에도 100M 이내에서 강편향되었다. 유출물의 거동 범위의 감소는 연행량의 감소로 나타나 유출물에 함유된 물질의 원역과정 시작지점에서 회석도는 각각 1.6과 3.5로 떨어졌다.

결국 배출유량이 감소하는 경우와 주변유속이 강한 경우 유출물의 거동은 약편향 영역이 감소하고 배출지점에서 가까운 거리에서 강편향되고 회석도는 감소하였다. 그러나 근역과정을 종료하고 수동확산이나 부양성 퍼짐이 일어나는 지점이 배출지점에서 근거리에서 발생하였다.

Fig. 15와 16은 창조류의 유속보다 강한 낙조류의 경우 유출물의 거동을 나타내고 있다. 유출물의 양에 따라 약편향 영역의 범위에 다소 차이는 있지만 강한 주변 흐름의 영향에 의해 거의 배출지점부근에서 강편향되었다.

Fig. 17과 18은 최대 낙조류와 최대 낙조류의 50%인 경우에서 상대적으로 적은 양의 유출물이 배출되는 경우로 배출운동량에 의해 배출지점으로부터 주변흐름의 수직방향으로 이동은 거의 나타나지 않고 있으며 부력의 영향으로 상류침투의 형태와 호안에 연한 벽면제트의 형태를 나타내고 있

다. 이 경우 거의 희석되지 않고 이동하는 것으로 나타났으며 이것은 벽면제트 형태로 거동함에 따

라 연행이 발생하는 표면적의 감소와 유출물과 호안사이에 재순환에 의한 것이다.

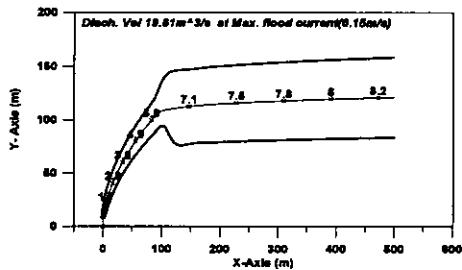


Fig. 11 Disch. from 1-port at Max. flood tide

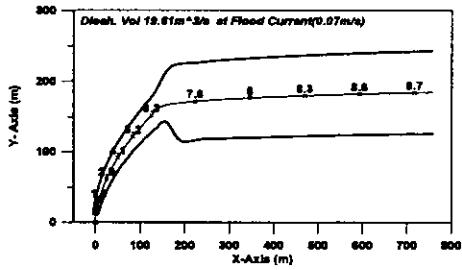


Fig. 12 Disch. from 1-port at flood tide

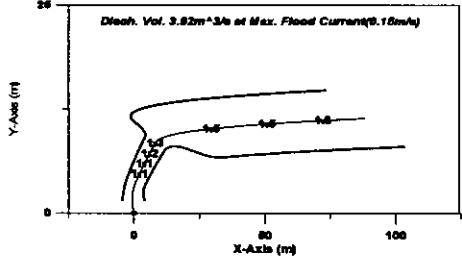


Fig. 13 Disch. from 5-port at Max. flood tide

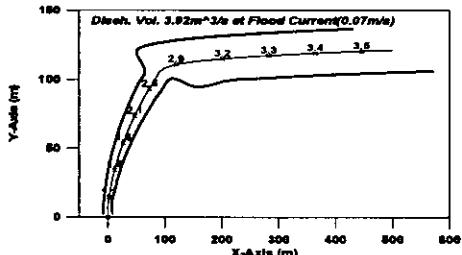


Fig. 14 Disch. from 5-port at flood tide

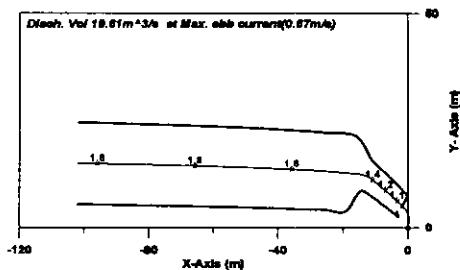


Fig. 15 Disch. from 1-port at Max. ebb tide

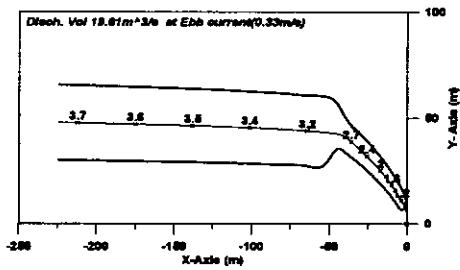


Fig. 16 Disch. from 1-port ebb tide

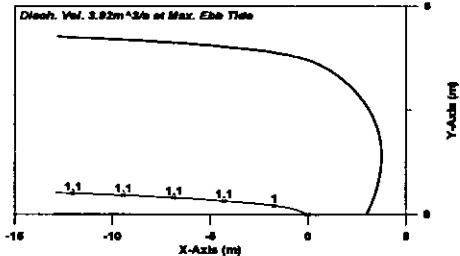


Fig. 17 Disch. from 5-port at Max. ebb tide

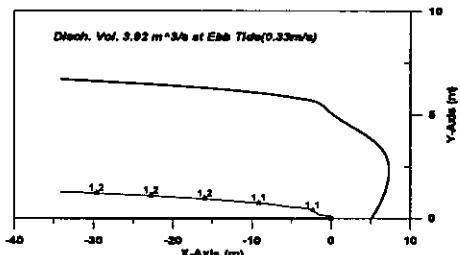


Fig. 18 Disch. from 5-port at ebb tide

## 5. 결론 및 제언

준설에 의해 주변환경에 미치는 영향은 준설이 이루어지는 장소에서 굴착작업으로 인한 발생하는 부유물 및 이로 인한 턱도문제, 부유물의 재퇴적 거동, 준설로 인한 퇴적오염물질의 부양과 준설토 투기장에서 연안 투기장의 여수, 해양투기장에서 준설토 자체 및 이에 포함된 오염물질의 투기에 의한 영향으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 준설토 처리방법 중 제한투기시설에서 배출되는 여수의 초기거동을 수치모델을 통해 분석하였다.

모델실험결과 목포항 주변해역과 같이 폐쇄형 항만의 형태를 나타내고 있고, 낙조우세의 조석형태와 같은 주변환경의 특성과 준설토 투기시설의 여수토 형태에 따라 여수의 거동 특성은 현저히 차이를 나타내었다. 이로 인한 혼합역의 물리적 영역한계와 이 영역내에 포함된 물질의 농도에도 큰 차이를 나타내었다. 근역의 범위는 최대 창조류의 50% 유속에서 단일 여수토의 경우에 750m로 최대 범위를 나타냈으며, 최대 낙조류에서 5개의 여수토가 설치된 경우 14m로 최소 범위를 나타냈다. 근역의 범위내에서 여수의 회석도는 근역의 범위에 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며 최대 8.7, 최소 1.1로 나타났다.

제한투기시설에서 발생하는 여수와 이에 포함되어 있는 오염물질의 거동해석에서는 기존의 방식인 오염부하량을 적용하는 것보다는 본 논문에서 다룬 것과 같이 초기혼합과정을 감안해야 하며, 매립호안 또는 준설토 투기장 조성단계에서부터 여수토의 형상과 개수, 투입되는 준설선의 규격, 공사기간, 투기될 준설토의 특성 등을 파악하고 여수 및 여수에 포함되어 유실되는 물질의 거동을 예측하여야 한다.

준설작업에서 가장 큰 관심의 대상이 되는 것은 배출수역의 환경에 미치는 투기의 영향이다. 따라서 제한투기시설의 경우 오염부하량의 강도가 높은 여수토 인근해역의 수질보호를 위해서는 배출물이 적절히 회석될 수 있는 혼합영역의 크기를 해역의 자정능력을 감안하여 결정하고, 배출물 제

트 또는 플룸의 형성, 이동 및 회석량에 사전에 예측하여 수질기준을 초과하는 지역이 가능한 한 최소가 되도록 하여야 하며, 혼합영역 내의 수질 기준도 지정하는 규정이 마련되어야 한다.

## 참고문헌

1. 마산시(1994), 마산만 준설에 따른 해양환경 종합 모니터링(1990~1994).
2. 목포지방해양수산부(1998), 목포남항 호안축조 실시 설계 용역 설계조위검토 및 수치모형실험 보고서.
3. 정대득(1996), “항만준설과 준설물의 해양투기에 관한 연구”, 석사학위논문, 한국해양대학교.
4. 해양수산부(1985~1998), 해운항만통계년보.
5. 해양수산부(1994), 목포항 광역개발 기본계획보고서 (I).
6. 해양수산부(1995), 목포신외항 안벽 실시 설계 보고서.
7. 해양수산부(1996), 항만공사 표준시방서
8. 해양수산부(1997), 부산신항개발사업 폐기물 해양배출 조사평가보고서.
9. 金子安雄, 堀江毅, 村上和男(1975), "ADI法による潮流汚染擴散の數値計算", 港灣技術研究報告書 第14券 第1號.
10. Gilbert R. J. et al(1996), "Cormix3 : An Expert System for Mixing Zone Analysis and Prediction of Buoyant Surface Discharges", US Environmental Protection Agency.
11. Doneker R. L. and G. H. Jirka(1990), "Expert System for Hydrodynamic Mixing Zone Analysis of Conventional and Toxic Submerged Single Diffuser Discharges(CORMIX1)", Rep. No. EPA/600/3-90/012, US Environmental Protection Agency, Environmental Research Lab. Athens, Georgia.
12. Jones J. M., G. H. Jirka, and D. A. Caughey(1985), "Numerical Techniques for Steady Two-dimentional Transcritical Stratified Flow Problems", Argonne National Lab. Rep. No. ANL/EES-TM-271.