

부유물 침전을 고려한 준설투기장 설계에 관한 연구

A Study on Design of Containment Area Considering Suspended Solid Sedimentation

지성현¹⁾ · 허병주¹⁾ · 천병식[†]

Jee, Sunghyun · Huh, Byungjoo · Chun, Byungsik

ABSTRACT : For optimum scale design of containment area, a series of laboratory tests using column were performed in this study as followings; sedimentation test and self-weight consolidation test for dredged soil, and suspended solid concentration test for supernatant. Containment area has been designed and evaluated, based on field condition and concentration of suspended solid of effluent water. In addition, the relation between width of containment area and target concentration of suspended solid was analyzed. The results show that concentration of suspended solid decreases as the width of containment area decreases and the length of containment area increases. It was also observed that influence of change in ponding depth should be considered to predict the change in suspended solid concentration in supernatant discharged as disposal is conducted; the lower target suspended solid concentration of effluent water, the more important.

Keywords : Dredged soil, Containment area design, Supernatant, Suspended solid, Concentration

요지 : 본 연구에서는 준설투기장의 설계를 위하여 실내시험으로 컬럼을 이용한 준설토 침강·자중압밀시험 및 상등수에 대한 부유물 농도시험을 수행하였으며, 현장조건과 배출수의 부유물 농도를 고려한 준설투기장을 설계·검토하였다. 준설투기장 폭과 목표 부유물 농도와의 관계 검토결과, 소요면적에서는 투기장 폭이 좁고 길이가 길수록 부유물 농도가 감소함을 알 수 있었다. 또한 준설투기장이 진행됨에 따라 배출되는 상등수의 부유물 농도의 변화를 예측하기 위하여 침강허용깊이의 변화에 대한 영향도 고려되어야 하며, 이는 배출수의 목표 부유물 농도가 낮을수록 더욱 중요하다.

주요어 : 준설토, 투기장 설계, 상등수, 부유물, 부유물 농도

1. 서론

최근 하천, 담수호, 저수지 등에서 장기간에 걸쳐 퇴적된 토사 및 오염물 제거를 위한 준설품사가 활발히 계획·시행되고 있으며, 이러한 준설품사의 설계는 준설패 운용 중에 발생하는 수질오염과 준설투기장에서 배출되는 여수의 수질 문제가 대두되고 있다.

기존의 준설투기장 설계는 주로 대규모 해안매립공사를 대상으로, 준설패 용량이나 준설패의 침강·자중압밀특성을 고려하여 준설패가 투기장 외부로 유출되지 않도록 규모를 산정하였으며, 국내외 많은 학자들(이송 등, 1994; Imai, 1980; Yano, 1985)이 이와 관련된 준설패의 침강·자중압밀 특성에 관한 연구를 수행하였다.

그런데, 최근에 전국적으로 수행되고 있는 4대강 살리기 사업의 경우, 준설패 지역이 주로 농경지 부근이나 산간 지역에 위치하여 준설패를 처리하는 투기장 및 야적장의 부

지가 부족하므로, 불리한 입지조건에 맞추어 투기장을 최소화하고 투기장 배출수의 환경기준을 만족시키는 설계 및 시공이 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 준설패의 설계를 위하여 실내시험으로 준설패에 대한 기본물성시험, 컬럼을 이용한 준설패 침강·자중압밀시험 및 상등수에 대한 부유물 농도시험을 수행하였으며, 배출수의 부유물 농도를 예측하여 현장 여건에 적합한 준설패를 설계하였다. 또한 최적의 준설패 투기장 설계를 위하여 준설패의 규모와 침강허용깊이의 변화에 대한 부유물 농도와의 관계를 구하였다.

2. 준설패 설계 이론

2.1 설계 기본 개념

준설패 설계는 미공병단(USACE, 1983; 1987)에서

1) 정희원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

† 정희원, 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

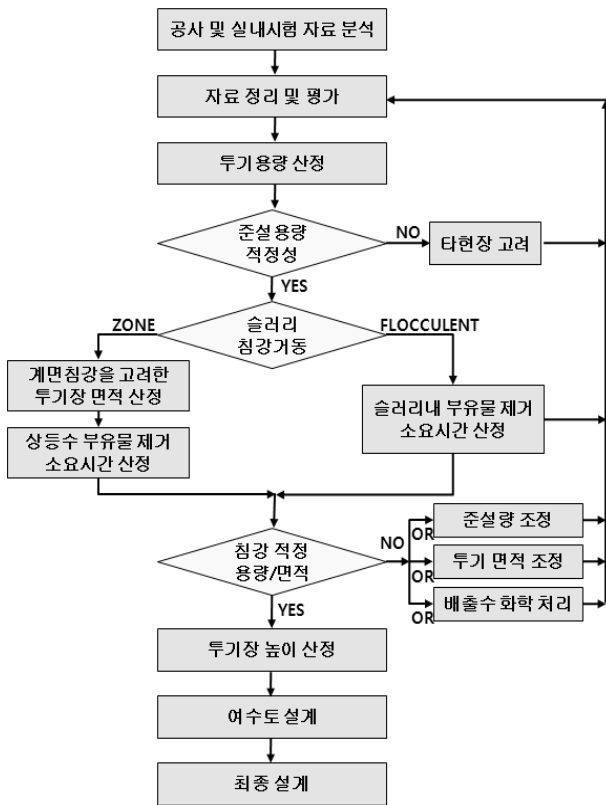


그림 1. 준설투기장 설계 흐름도

제안한 준설투기장 설계를 적용하였으며, 설계 흐름도는 그림 1과 같다. 일반적으로 준설투기장이 적절히 설계되고 운영된다면 토출구로부터 나온 고함수비(500~1000%)의 준설토는 여수토 쪽으로 흘러가면서 대부분의 토립자들이 침전되며, 일부의 부유물만이 상등수의 흐름을 따라 여수토로 배출된다. 만약 배출수의 부유물이 허용 기준농도보다 높다면, 준설토의 준설향 또는 투기장의 면적을 조정하거나 배출수를 응집제 또는 필터를 통하여 처리하여야 한다.

준설투기장 설계는 고려되어야 하는 현장 조건에 따라서 크게 3가지 방법으로 분류되며, 준설투기 용량, 준설토의 계면침강 및 상등수 부유물 침전이 있다. 3가지 방법 중 준설투기 용량 및 준설토의 침강·자중압밀 거동을 고려한 설계 해석에 대해서는 이미 많은 연구(유건선, 2000; 유남재 등, 2002; 이승원 등, 2000; Stark 등, 2005)가 수행되었으므로, 본 논문에서는 주로 상등수 부유물 침전을 고려한 방법에 대하여 논하였다.

2.2 부유물의 침전을 고려한 투기장 설계

투기장 내에서 준설토의 계면고가 여수토의 높이보다 낮을 경우, 준설토의 직접적인 배출은 발생하지 않고 계면고 상부에 존재하는 상등수만 배출된다. 이 상등수에는 투기장 내에서의 체류기간 동안에 미처 계면고 이하로 침전되지 않

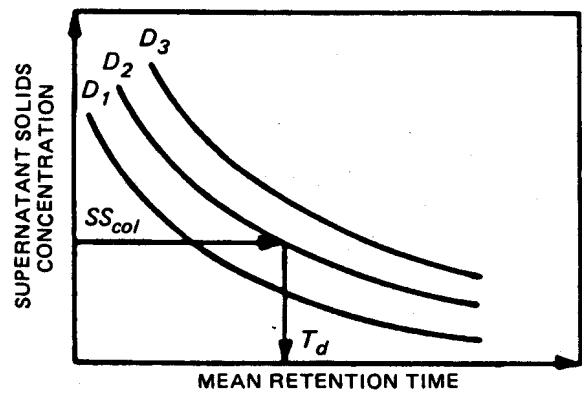


그림 2. 컬럼시험에서 경과시간별 부유물 농도

표 1. 투기장의 면적 및 침강허용깊이에 따른 재부유 계수(Resuspension Factors)

투기장 면적	투기장내 평균 허용침강깊이(H _{pd})	
	0.6m 이하	0.6m 이상
400,000m ² 이하	2.0	1.5
400,000m ² 이상	2.5	2.0

은 부유물이 존재하며, 투기장의 면적은 부유물의 농도가 허용치 이하가 되도록 침전할 수 있는 면적이 필요하다.

계면침강거동을 나타내는 준설토에 있어서 입자침강은 계면상부의 상등수에서 발생하므로 컬럼을 이용한 침강시험 시 깊이(D₁, D₂, D₃)에 따른 상등수의 부유물 농도(SS_{col}, mg/L)를 경과시간별(T_d)로 측정하여 그림 2와 같이 정리하였다.

침강시험결과로부터 구한 부유물 농도와 체류시간과의 관계는 바람에 의한 파랑이나 흐름의 영향이 없는 실내조건에서 산정되었다. 그러나 실제 현장에서는 침전된 부유물이 파랑과 흐름에 의하여 재부유되며, 현장에서의 상등수 부유물 농도는 실내시험결과로부터 예상되는 값보다 크므로 다음과 같은 단계를 통해서 보정할 필요가 있다.

투기장에서 배출되는 부유물의 예상 농도, C_{eff}에 해당하는 실내 컬럼시험에서의 부유물 농도, C_{col}는 식 (1)과 같이 산정한다. 재부유 계수는 투기장 면적 및 침강허용깊이(ponding depth, H_{pd})를 고려하여 표 1에서 구한다.

$$C_{col} = C_{eff} / RF \quad (1)$$

여기서, C_{col} = 컬럼시험에서 구한 부유물 농도(mg/L)

C_{eff} = 재부유를 고려한 여수토 배출수의 부유물 농도(mg/L)

RF = 재부유 계수(Resuspension Factor)

상기의 그림 2를 이용하여 C_{col}에 상응하는 소요 최소 평균 체류시간을 구하고, 이론적 체류시간(T)은 투기장의 비효율성을 고려한 수리효율보정계수(Hydraulic Efficiency Correction

Factor, HECF > 1.0)에 의해 식 (2)와 같이 보정되어야 한다. 즉, 현장 평균체류시간(T_d)은 이론적 체류시간에 비해 훨씬 짧다.

$$T = T_d \cdot (\text{HECF}) \quad (2)$$

여기서, T : 이론적 체류시간

T_d : 현장 평균체류시간

$$\frac{1}{\text{HECF}} = 0.9[1 - \exp(-0.3 \frac{L}{W})] \quad (3)$$

여기서, L/W : 투기장의 길이/폭

또한 준설토가 토출구로부터 여수토까지 흘러갈 때 전 투기장 면적을 균일하게 거쳐 나가지 않고, 투기장의 형상에 따라 실제 흘러가는 면적은 다르며 전 투기장 면적보다 작다. 입자침강은 이 면적을 따라 발생하므로 입자침강을 허용할 수 있는 설계 투기면적은 식 (4)로 산정한다.

$$\frac{A_{df}}{\text{HECF}} = \frac{T_d \cdot Q_i}{H_{pd}}$$

$$A_{df} = \frac{T \cdot Q_i}{H_{pd}} \quad (4)$$

여기서, Q_i : 시간당 준설투기량(m^3/hr)

설계 투기면적(A_{df})이 실제 사용가능한 투기면적을 초과할 경우에는 침강허용깊이를 깊게 하거나, 응집제를 사용하여 부유토립자를 강제 침전시켜야 한다.

3. 준설토에 대한 실내시험

준설투기장 설계시 필요한 토질정수 산정을 위하여 준설토

표 2. 준설토 시료의 기본물성

비중	애터버그한계		입도분석(통과율,%)				USCS
	LL(%)	PI(%)	#4	#40	#200	2 μ m	
2.69	NP	NP	98.5	70.4	39.8	8.9	SM

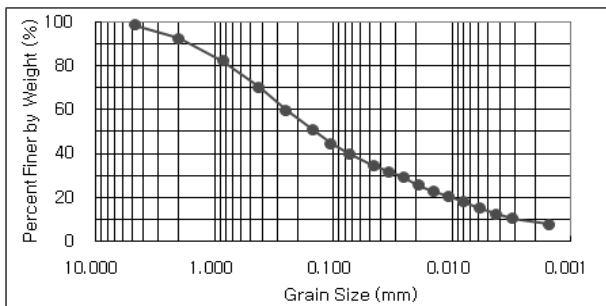


그림 3. 시료의 입경가적곡선

토에 대한 기본물성시험, 컬럼을 이용한 침강·자중압밀시험 및 상등수에 대한 부유물 농도시험과 같은 실내시험이 필요하다. 이러한 시험결과들로부터 준설토의 공학적 특성, 계면침강속도, 유효응력-간극비-투수계수의 관계, 시간에 따른 상등수의 부유물 농도 변화 등을 구하여 설계 시 적용한다.

3.1 기본 물성시험

실내시험에서 사용된 준설토 시료는 본 연구대상 현장의 준설토구역에서 채취하였다. 시료의 기본물성을 구하기 위하여 비중시험, 액·소성한계시험, 입도시험을 실시하였으며, 시험결과는 표 2, 그림 3과 같다.

3.2 준설토 침강·압밀시험

준설토의 침강 및 자중압밀 특성을 구하기 위하여 그림 4와 같이 침강 컬럼 및 마노미터를 사용하여 침강·압밀시험을 수행하였다. 침강 컬럼은 높이 200cm, 직경 20cm로 침강·압밀시 wall effect를 최소화 하였으며, 50cm 간격으로 시료 샘플링 및 간극수압 측정용 밸브를 설치하였다. 본 시

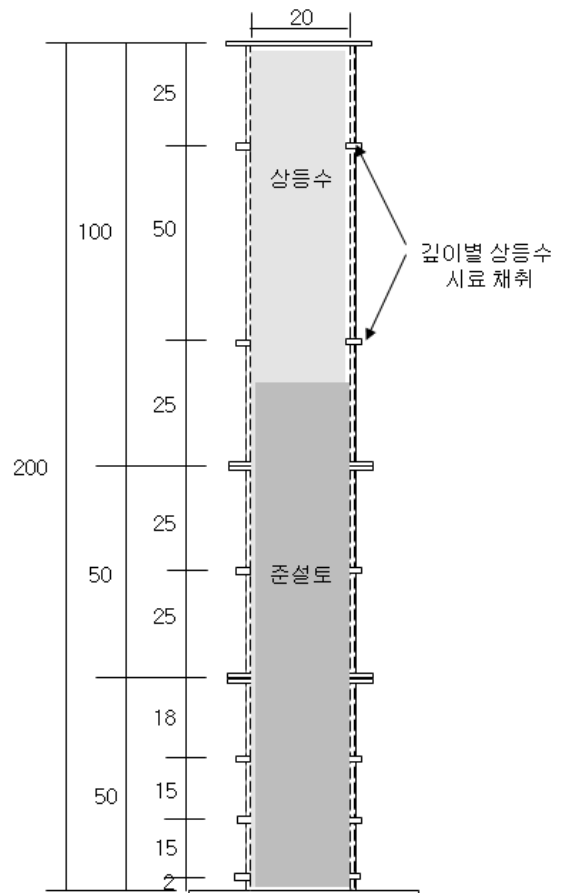


그림 4. 침강 및 자중압밀 시험용 컬럼

험에서 준설토의 계면침강속도, 유효응력-간극비-투수계수의 관계를 구하여 그림 1의 준설토의 계면침강을 고려한 준설투기장 설계에 사용된다.

시험 시 준설토의 초기 함수비는 현장의 준설투 평균 함수비 600%로 맞추었으며 시험기간(67일)동안 계면고, 깊이별 간극수압, 포화단위중량, 함수비 등을 측정하였다.

경과시간에 따른 준설투 계면고의 변화는 그림 5와 같다. 시험 시작 후 약 24시간까지는 침강단계의 경향을 보였으며, 그 이후부터는 자중압밀이 시작된 것으로 판단된다.

그림 6은 경과시간에 따른 깊이별 함수비, 간극수압의 변화를 나타낸 것인데, 측정값 모두 침강단계에서 자중압밀단계로 접어드는 24시간 경과 후 부터 비교적 변화 속도가 감소하였다.

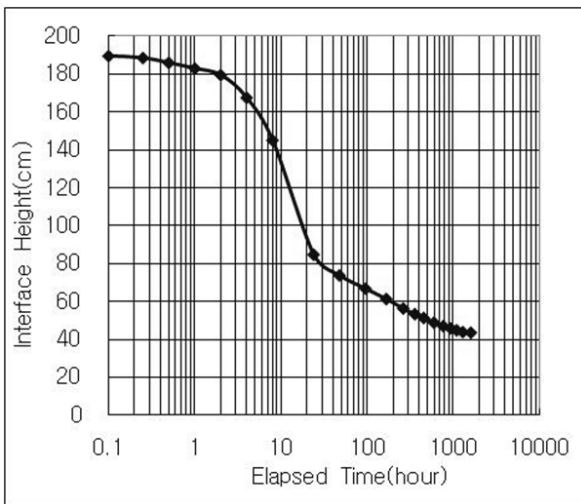
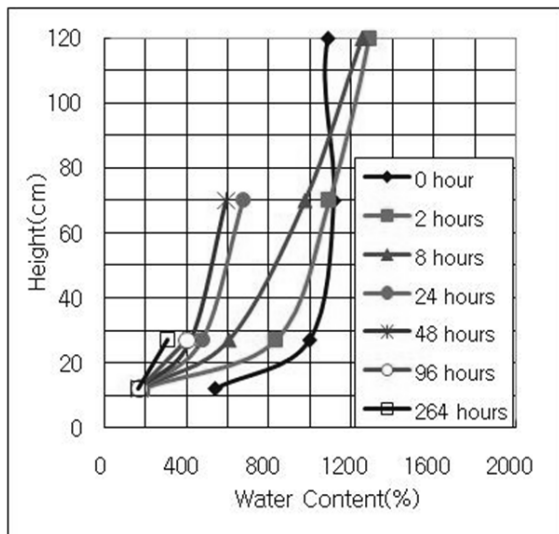


그림 5. 경과시간에 따른 계면고 변화



(a) 함수비 변화

3.3 상등수 부유물 농도 시험

상등수 부유물 농도시험은 준설투 침강 시 수면과 계면고 사이에 존재하는 상등수에 잔류한 부유물의 농도를 시간별로 측정하여 경과시간에 따른 부유물 농도의 관계식을 구하는 시험이다. 이 관계식은 2.2에서 언급한 부유물의 침전을 고려한 최소 투기면적 산정 시 이용되며, 지속적으로 투기장에서 배출되는 상등수의 수질 유지를 위하여 중요하다.

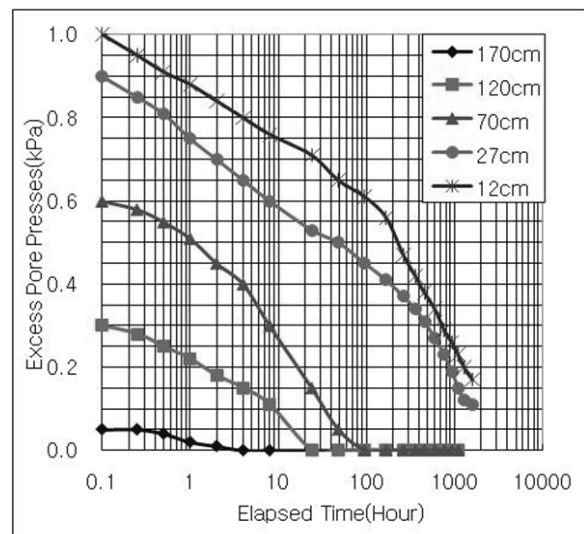
본 시험에서는 컬럼 벽면에 50cm 간격으로 설치된 2개의 밸브를 이용하여 침강시험 시작 후 8, 24, 48, 96, 168시간 경과 시점에 상등수를 각 100mL씩 채취하여 유리섬유 여지법으로 상등수의 부유물 농도를 측정하였다.

상등수 채취 시 준설투 계면이 밸브에 가까이 있을 경우 침전된 부유물이 재부유하여 측정결과에 영향을 줄 수 있으므로, 채취시간은 계면이 밸브에서 5cm 이상 침강했을 때의 시간으로 하였다. 경과시간에 따른 상등수의 깊이별 부유물 농도 측정결과와 평균 농도에 대한 관계식은 그림 7에 나타내었다.

4. 현장 투기장 설계

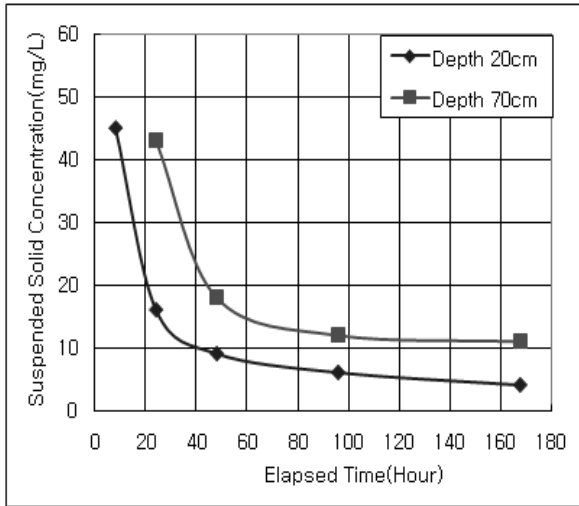
4.1 현장 개요

본 연구의 대상현장인 OO현장은 준설투를 통한 오염 퇴적물 제거와 수질개선, 부지조성을 위한 성토재 공급이 사업의 목적이다. 준설투구역은 부영양화 및 수질기준 IV등급 초과 등 수질개선이 필요한 상태이므로, 준설투 작업 시 부유물 발생에 의한 수질오염 및 준설투 투기장을 거쳐 침전지에서

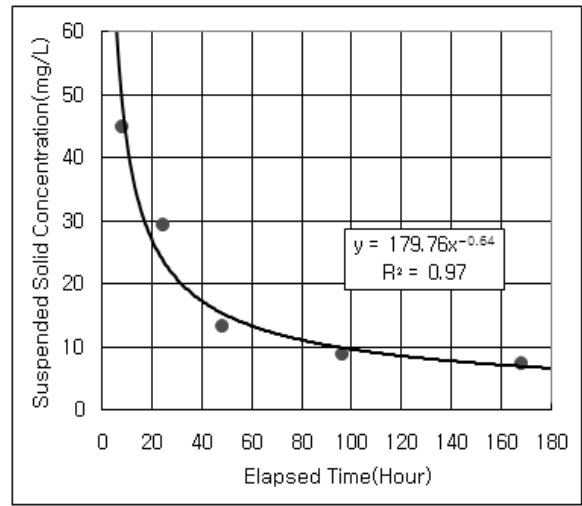


(b) 과잉간극수압

그림 6. 경과시간에 따른 깊이별 함수비, 과잉간극수압 변화



(a) 깊이별 부유물 농도 변화



(b) 경과시간별 부유물 평균 농도 관계식

그림 7. 경과시간에 따른 상등수의 부유물 농도

배출되는 상등수의 수질 관리가 상당히 중요하다.

따라서 준설투기장 설계 시 배출수의 수질관리를 위하여 상등수 부유물 침전을 고려한 방법을 사용하였으며, 운용되는 준설투기장의 용량 및 현장 준설투기장 조건을 고려하여 준설투기량 6,000m³/hr, 투기되는 준설투기장 평균 함수비 600%, 침

강허용깊이(ponding depth)는 1.0m로 적용하였다.

4.2 준설투기장 설계

OO현장의 준설투기장 설계는 앞서 언급한 바와 같이, 상등수 부유물 침전을 고려한 설계법을 적용하였다. 본 현장은 준설투기장에서 1차로 모래, 자갈과 같은 조립질 준설투기를 침강시키고 점토질의 미세한 준설투기는 대규모 침전지에서 2차로 침전시키므로 준설투기장에서 배출하는 상등수의 목표 부유물 농도(C_{eff})는 200mg/L로 하였다. 현장에서 가용할 수 있는 준설투기장의 규모는 최대 폭 150m, 길이 320m이다. 상기의 조건들을 고려한 설계 검토는 표 3에 요약하였으며, 현장의 준설투기장 규모는 최소투기장 면적을 충분히 만족하는 것으로 산정되었다.

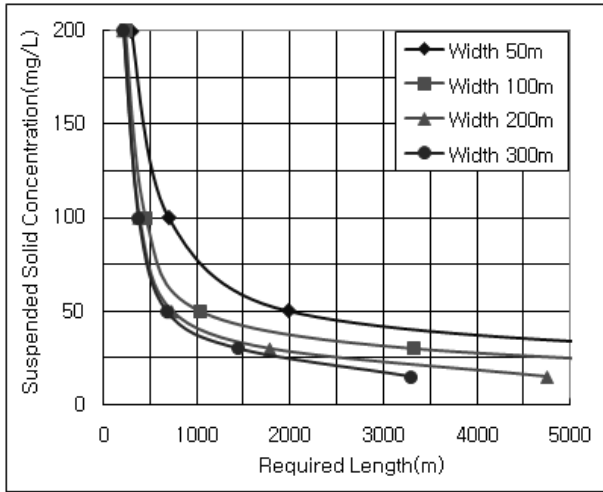
표 3의 검토 과정을 준설투기장 폭과 목표 부유물 농도를 변화시키며 반복 계산하면 표 4, 그림 8과 같은 부유물 농도와 준설투기장 규모와의 관계를 구할 수 있다. 그림 8(b)를 보면, 설계시 적용되는 수리효율 보정계수(HECF)의 영향으로 인하여 동일한 소요면적에서는 투기장 폭이 좁고 길이가 길수록, 다시 말해서 상등수의 유로를 길게 할수록 부유물

표 3. 상등수 부유물 침전을 고려한 준설투기장 설계

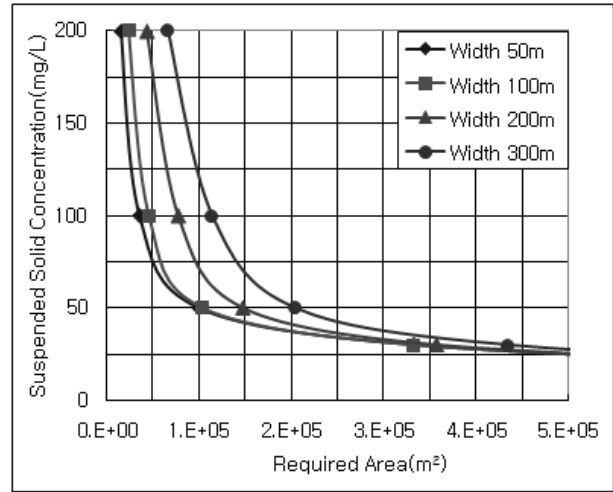
설계 정수	산정값
배출시 상등수 목표 부유물 농도(C _{eff})	200mg/L
컬럼시험 시 상등수 부유물 농도(C _{col})	133mg/L
재부유계수(RF)	1.5
이론적 체류시간(T)	4.2hour
현장 평균체류시간(T _d)	1.8hour
수리효율 보정계수(HECF)	2.35
투기장 길이(L)	320m
투기장 폭(W)	150m
시간당 준설투기량(Q)	6,000m ³ /hr
침강허용깊이(H _{pd})	1.0m
최소 투기장면적(A)	25,343m ²
투기장면적(A _d)	48,000m ²
투기장면적>최소 투기장면적	O.K

표 4. 부유물 농도와 준설투기장 규모와의 관계

부유물농도 (mg/L)	소요길이(m)				소요면적(m ²)			
	폭 50m	폭 100m	폭 200m	폭 300m	폭 50m	폭 100m	폭 200m	폭 300m
15	19,030	9,520	4,760	3,300	951,500	952,000	952,000	990,000
30	6,640	3,320	1,790	1,450	332,000	332,000	358,000	435,000
50	1,980	1,040	740	680	99,000	104,000	148,000	204,000
100	700	460	390	380	35,000	46,000	78,000	114,000
200	300	240	220	220	15,000	24,000	44,000	66,000



(a) 소요길이



(b) 소요면적

그림 8. 투기장 폭에 따른 부유물 농도와 준설투기장의 소요길이 및 면적

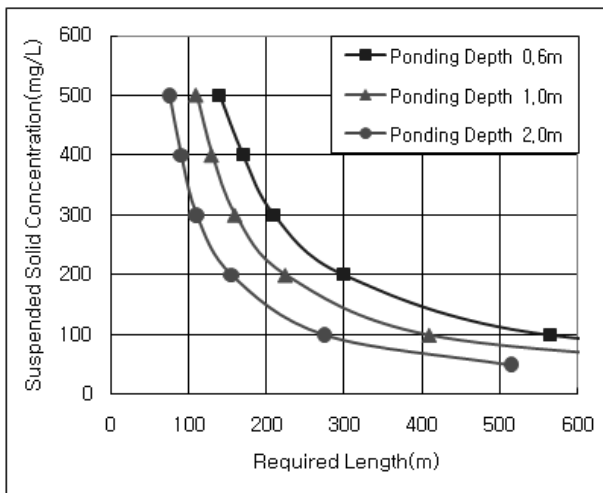


그림 9. 침강허용깊이에 따른 부유물 농도와 준설투기장의 소요길이

농도가 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서 현장에서 준설투기장 조성 시에 이 결과를 이용하면 준설투기장에서 배출되는 상등수의 목표 부유물 농도 및 부지조건에 적합한 준설투기장의 최적 규모를 선택하여 시공할 수 있다.

그림 9는 폭 150m의 준설투기장에 대하여 침강허용깊이를 0.6~2.0m로 변화시키며 소요길이를 산정한 것이다. 동일한 부유물 농도에서 침강허용깊이가 작을수록 소요길이가 증가하였으며, 목표 부유물 농도가 낮을수록 소요길이가 현격히 증가하였다. 현장에서 준설 투기시 투기장 내의 수면이 일정한 상태에서 계면고가 상승하면 준설토의 침강허용깊이가 감소하므로, 결과적으로 준설투기가 진행됨에 따라 배출되는 상등수의 부유물 농도 증가를 예측하기 위하여 침강허용깊이의 변화에 대한 영향도 고려되어야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 준설투기장의 설계를 위하여 실내시험으로 준설토에 대한 기본물성시험, 컬럼을 이용한 준설토 침강·자중압밀시험 및 상등수에 대한 부유물 농도시험을 수행하였으며, 배출수의 부유물 농도를 예측하여 현장여건에 적합한 준설투기장의 최적 규모를 산정한 결과는 다음과 같다.

- (1) 준설투기장 폭과 목표 부유물 농도와의 관계를 검토한 결과, 설계 시 적용되는 수리효율 보정계수(HECF) 영향으로 인하여 동일한 소요면적에서는 투기장 폭이 좁고 길이가 길수록 부유물 농도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서, 준설투기장 설계시 동일면적에서는 길이가 길수록 유리하며, 투기장 부지 조건상 폭과 길이가 비슷할 경우에는 투기장 내부에 가토제를 설치하여 투기된 준설토가 이동하는 유로를 길게 하는 것이 효율적이다.
- (2) 동일한 부유물 농도에서 침강허용깊이가 작을수록 소요길이가 증가하였다. 따라서 준설투기가 진행됨에 따라 배출되는 상등수의 부유물 농도 변화를 예측하기 위하여 침강허용깊이의 변화에 대한 영향도 고려되어야 하며, 이는 현장에서 요구되는 투기장 배출수의 부유물 농도 기준이 낮을수록 더욱 큰 영향을 미친다.

참 고 문 헌

1. 유건선(2000), 해상 점토를 이용한 준설매립토의 침하해석 및 투기장 설계, *현대건설 초연약 준설매립토의 특성 및 지반개*

량기술 특별세미나, pp. 23~53.

2. 유남재, 박병수, 김근수(2002), 고함수비 준설매립토의 구성 관계획득을 위한 역해석기법, *대한토목학회논문집*, Vol. 22, No. 1-C, pp. 21~31.
3. 이승원, 지성현, 유석준, 이영남(2000), 준설매립지반의 침강·압밀거동, *한국지반공학학회논문집*, Vol. 16, No. 4, pp. 149~156.
4. 이송, 양태선, 황규호(1994), 준설매립점토의 자중압밀특성에 관한 연구, *대한토목학회 논문집*, Vol. 14, No. 4, pp. 953~963.
5. Imai, G.(1980), Settling Behavior of Clay Suspension. *Soil and Foundations*, Vol. 20, No. 2, pp. 61~77.
6. Stark, T. D., Choi, H., and Schoroeder, P. R.(2005), Settlement of Dredged and Contaminated Material Placement Area I: Theory and Use of Primary Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 131, No. 2, pp. 43~51.
7. USACE(1983), *Dredging and Dredged Material Disposal(EM1110-2-5025)*, US Army Corps of Engineers, Washington D.C., pp. 67~74.
8. USACE(1987), *Confined Disposal of Dredged Material(EM1110-2-5027)*, US Army Corps of Engineers, Washington D.C., pp. 39~62.
9. Yano, K.(1985), Properties of Very Soft Ground Reclaimed by Dredged Marine Clay and Their Prediction. *Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 364, No. 3-4, pp. 1~14.

(접수일: 2010. 5. 4 심사일: 2010. 5. 11 심사완료일: 2010. 7. 9)