

원심모형실험의 지반환경공학적 이용: 캡핑된 준설퇴적토의 압밀과 오염원 이동 Utilization of Centrifuge Test in Geoenvironmental Engineering: Consolidation and Contaminant Transport at Capped Dredged Sediment

김태형¹⁾, Tae-Hyung Kim, 강기민²⁾, Ki-Min Kang, 이정우³⁾, Jeong Woo, Lee, 정수정⁴⁾, Su-Jung Jung

¹⁾ 국립 한국해양대학교 공과대학 건설환경공학부 조교수, Assistant Professor, Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University

²⁾ (주)평원엔지니어링 이사, Director, Pyeongwon Engineering

³⁾ 금호건설 경영혁신팀 과장, Manager, Management Innovation Team, Kumho Construction & Engineering

⁴⁾ 국립 한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 학생, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University

SYNOPSIS : Sandy soils are generally used as a capping material to reduce the pollutants transport from the contaminated dredged sediment. However, dredged material capping is not widely used because regulatory agencies are concerned about the potential for contaminants migration through the cap. Movement of contaminated pore water from sediment into cap is mainly related to sediment consolidation during and after cap placement. To evaluate the significance of consolidation induced transport of contaminants from sediment into cap, research centrifuge tests were conducted. Centrifuge test results illustrate that advection and dispersion are the dominant contaminants transport processes and that capping reduces the potential of contaminant migration from the dredged sediment effectively.

Key words : Cap, Consolidation, Dredged sediment, Centrifuge, Advection dispersion equation

1. 서 론

매년 일정량의 하천 및 항구주변의 해안 퇴적토는 수로와 항로의 기능을 유지하기 위해 준설이 되어야 한다. 준설의 목적은 적정한 수로를 확보하기 위해 반드시 시행되어야 하는 것으로 미국의 경우 National Research Council(1997) 보고에 의하면 523 million m³ 퇴적토가 매년 준설이 되는 것으로 보고되고 있다. 이들 준설토는 주로 수중상태의 투기장등에 투하되어 다시 퇴적되어 처분되는 과정을 거치게 된다. 여기서 한 가지 간과할 수 없는 것은 상당량의 퇴적토가 준설 전 이미 오염되어 있어 결과적으로 투기장의 준설퇴적토 또한 많은 오염원을 포함하고 있다는 것이다. 현재 오염된 준설퇴적토로부터 오염원의 이동을 줄이기 위한 방안으로 모래를 이용한 캡층 포설이 활용 되고 있다. 퇴적토를 준설 투기한 후 캡핑을 하는 방법이 경제적인 측면에서 준설토를 직접 정화 처리하는 비용 보다는 훨씬 적은 비용이 들고, 환경적인 측면에서 캡핑이 오염원 유출을 감소시킬 수 있어 더 안전하다는 이점이 있기 때문이다. 하지만 준설토의 캡핑이 오염원 유출을 얼마만큼 효과적으로 감소시키는지에 대해서는 관련 연구 자료의 부족과 적절한 실험방법의 부재로 담당 관리들이 많은 우려를 갖고 있는 현실이다.

준설퇴적토로부터 캡을 통과하여 확산에 의한 오염원 이동을 평가할 수 있는 실내실험방법은 현재 개발되어 사용되고 있으나(Palermo et al., 1998; Wang et al., 1991; Thoma et al., 1993), 확산은 캡핑의 효과에 영향을 미치는 주 과정은 아닌 것으로 알려져 있다(Thibodeaux et al., 1998). 준설퇴적토로부터 캡층을 통한 오염된 간극수의 이동은 캡이 설치되기 전 후의 준설퇴적토층의 압밀에 의한 영향이 확산에 의한 것보다 더 크다고 볼 수 있다. 압밀에 의한 준설퇴적토 지반의 간극수 이동은 재료와 시간에 밀접한 관련이 있는데 캡층 재료인 조립토의 경우 짧은 시간에 압축이 되고 세립토의 경우 점진적으로 장시간 압축이 되는 특성이 있다. 하지만, 압밀에 의한 준설퇴적토로부터 캡층을 통과한 오염원의 이류이동에 대한 정보가 부족하고, 이에 대한 평가는 캡핑층을 설계할 때 고려되지 않고 있다.

그래서 본 연구에서는 원심모형실험을 이용하여 압밀에 의한 준설퇴적토로부터 캡층을 통과하는 오염원의 이류이동을 평가하는데 그 목적이 있다. 이를 위해, 다음의 항목들이 본 연구에서 수행되었다.

- 1) 캡핑재료와 준설퇴적토에 대한 물리적 화학적인 특성을 규명하였다.
- 2) 캡핑층과 준설퇴적토의 침하량을 측정하기 위해 원심모형실험이 실시되었다.
- 3) 압밀에 의한 오염원의 이류이동을 평가하기 위해 식별용 방사선 동위원소인 TCDD를 이용한 원심모형실험이 실시되었다.

2. 원심모형실험의 필요성

보통 캡핑의 특성을 파악하는데 사용되는 칼럼실험에서는 시간에 따른 오염원의 특성변화는 알 수 있으나 캡핑에 의한 준설퇴적토의 압밀에 따른 침하나 오염원 이동은 알 수가 없다. 캡핑과 준설퇴적토에 대한 축소모델을 이용한 원심모형실험에서 압밀에 따른 오염원이동과 지반의 침하 특성을 파악하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 원심모형실험에 의한 다공질 재료에 대한 간극수의 흐름과 세립토의 압밀거동에 대한 연구가 많이 진행이 되었다 (Cargill and Ko, 1983; Cooke and Mitchell, 1991). 이들 연구 결과에 의하며 적적할 비례 법칙(표 1)에 의해 원심모형실험에서 물의 이동을 충분히 묘사시킬 수 있음을 알았다. 또한 원심모형실험을 통한 오염원의 이동에 대한 연구도 많이 실시되어 그 이용이 입증되고 있다(Vallar and Merrifield, 1994; Zimmie et al., 1994).

3. 실험 재료

본 연구에 사용된 준설퇴적토는 미국의 뉴욕과 뉴저지 항구 일원의 11개 지역에서 준설퇴적 흙이 혼합된 것이다. 캡핑 재료는 뉴욕 항의 Ambrose 수로에서 채취된 것을 사용하였다. 각각의 실험재료의 물리적 특성은 표 2와 같으며, 준설퇴적토와 캡핑 재료는 각각 유기질 점토(OH)와 실트질 모래(SP-SM)로 분류된다. 두 재료에 대한 각각의 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 캡핑재료와 준설퇴적토에 대한 압밀실험(EM 1110-2-5027)도 실시되었는데 이것은 장기간에 걸친 재료의 체적변형 특성을 알기위해 실시되었다. 그림 2는 압밀실험 결과로 준설퇴적토는 압축성이 큰 특성을 보이는 반면 캡핑재료인 실트질 모래는 비압축성 특성을 보임을 알 수 있다. 준설퇴적토에 대한 화학적 특성 분석도 같이 실시가 되었다(표 3).

원심모형실험을 통해 준설퇴적토로부터 캡층을 통한 오염원의 이동을 관찰하기 위해 탄소-14 식별용 방사성 동위원소 물질인 2,3,4,7-tetrachloro[U-14]dibenzo-p-dioxin(TCDD)가 사용되었다. TCDD는 베타 방사체로 반감기가 5730년이고 0.156MeV의 방사능을 발산하는 물질로 실험에서 준설퇴적토에 24 μ g/kg의 농도로 섞여졌다. TCDD 분석에는 200 μ m크기의 조각이 사용되었다. 또한 오염원의 이동을 추적하기 위해 Rhodamine WT 염료가 사용이 되었다. 1000g의 준설퇴적토에 4ml당 1000ppm의 농도를 가지는 Rhodamine 염료와 섞어 24시간동안 믹서기에서 섞여진 후 실험에 이용되었다.

표 1. 원심모형실험에서 원형과 모델 사이의 비례관계

Quantity	Prototype	Model
Length	N	1
Area	N ²	1
Volume	N ³	1
Velocity	1	N
Acceleration	1	N
Mass	N ³	1
Force	N ²	1
Stress	1	1
Strain	1	1
Time (Advection)	N ²	1

표 2. 준설퇴적토와 캡핑재료의 물리적 특성

Parameter	ASTM Method	Sediment	Cap
% Sand	D-422	33	94
% Fines	D-422	66	6
Water Content (%)	D-2216	113	29
Organic Content (%)	D-2974	2.6	0.2
Density (pcf) g/cm ³		1.4 (88)	1.95 (121)
Specific Gravity	D-845	2.64	2.68
Void Ratio		2.98	0.77
Porosity		0.75	0.44
Soil Classification	D-2487	CH	SP-SM
Effective Size, D ₁₀ (mm)		0.004	0.17
Mean Particle Diameter (mm)		.06	0.35
Hydraulic Conductivity (cm/sec)		4 x 10 ⁻⁵	1 x 10 ⁻³
Plasticity Index (%)	D-4318	39	
Liquid Limit (%)	D-4318	76	

표 3. 준설퇴적토의 화학적 특성 분석 결과

Chemical/metal	Procedure	Detection limits		Average in Sediment (mg/kg)
		water (mg/l)	sediment (g/kg)	
NH ₃ -N	EPA-600-350.1 EPA-CRL -324	0.01		164
TOC	EPA-CE-81-1	1.0	1.0	68500
Chromium	SW-846-6020	0.0003	0.2	193
Copper	SW-846-6020	0.001	0.1	620
Iron	SW-846-6020	.005	2.0	36217
Manganese	SW-846-6020	0.00002	0.1	348
Mercury	SW-846-7470A	0.000004	0.04	2.38
Lead	SW-846-6020	0.00002	1.0	420.5

Arsenic	SW-846-7060A	0.001	2.0	20.2
Cadmium	SW-846-6020	0.000008	0.1	13.6
Zinc	SW-846-6020	0.0006	1.0	947
Nickel	SW-846-6020	0.0001	2.0	108.9
Silver	SW-846-7761	0.00010	0.10	9.17
Total PCB				9.77
Total PAH				89.08
Total Dioxins				0.026
Total Furans				0.013

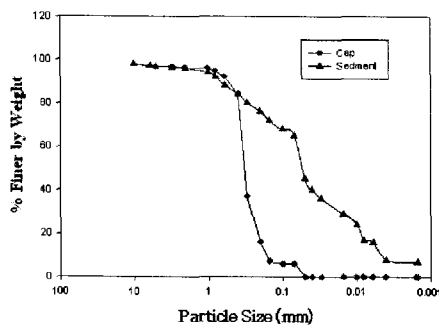


그림 1. 입도분포곡선 : 준설퇴적토와 캡핑재료

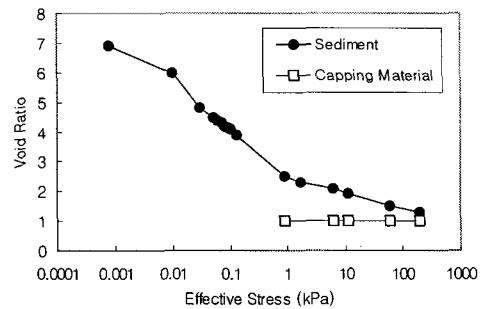


그림 2. 압밀곡선 : 준설퇴적토와 캡핑재료

4. 실험 장비 및 기기

본 연구에 사용된 원심모형시험기는 미국 수로실험연구소(Waterways Experiment Station, WES)의 기기로 반경이 6.5m이고 350g까지 가속이 가능하다. 이 원심모형시험기는 143g조건에서 최대 8,000kg까지 하중을 재하할 수 있고, 350g 조건에서는 2,000kg까지 하중을 재하할 수 있다.

실험에 사용된 모델상자는 두께 1.27cm의 아크릴판을 사용하여 길이 12cm, 폭 30.5cm, 높이 45.7cm로 제작하였다. 모델상자 양쪽에는 구멍을 만들어 실험중에 물을 샘플링 할 수 있도록 하였다. 그림 3(a)는 모델상자의 도식도로 준설퇴적토층, 캡핑층, 계측기기로 구성되어 있음을 알 수 있다. 모델상자는 본 실험에 앞서 사용된 압력을 가하여 상자의 파괴가능성, 물이 새는 현상들을 체크한 결과 아무 이상이 없는 것으로 나타났다. 그림 3(b)는 실제 실험에 사용된 모델상자를 나타낸다.

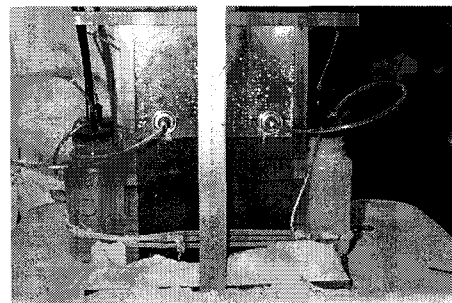
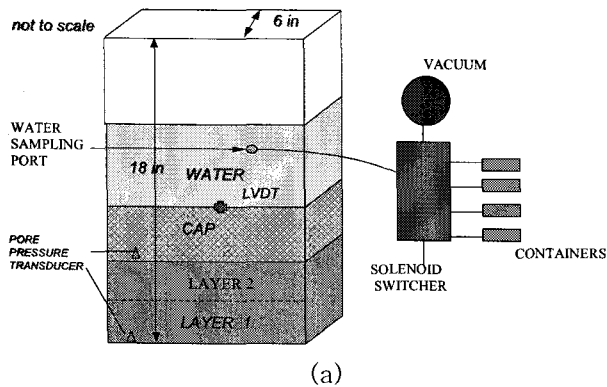


그림 3. 모델상자의 도식도(a)와 실제 모습(b)

실험 중 준설퇴적도의 연직변형률을 측정하기 위해 LVDT를 사용하였다. 실험중 LVDT가 압밀이 발생하기 전 각 층의 윗부분에 유지될 수 있도록 고정발 장치를 제작하여 사용하였다. 고정발 장치는 고리쇠를 각 LVDT 끝에 접촉제를 사용하여 부착시켰다. 각 LVDT는 모델상자의 중앙부분에 그리고 각 층의 표면에 놓여두었다

실험 중 정해진 시간에 물을 샘플링하기 위해 부유식샘플링 시스템이 제작되었다. 4개의 샘플링 연결 라인인 스텐레스로된 관(직경 0.64cm, 길이 15.24cm, 끝이 120° 구부러진)과 금속 마개로 구성된 폴리에틸렌 튜브로 만들었다. 이 폴리에틸렌 튜브의 한쪽은 샘플링 용기 마개에 연결이 되고 다른 한쪽은 샘플링 입구에 삽입되어 수면으로 부터 중간에 위치 시켰다. 5개의 솔레노이드 밸브가 진공도를 조절하여 샘플링 시스템을 통제하였다. 4개의 샘플링 용기는 개별적으로 폴리에틸렌 튜브에 의해 솔레노이드 밸브와 연결됐다. 샘플이 용기에 채워졌는지 여부는 물이 샘플용기에 들어왔을때 용기 안쪽에 설치된 전류 흐름 감지봉을 통해 전류의 변화를 측정하여 확인하였다. 물이 용기에 차면, 데이터획득시스템에서 전류 상승을 확인할 수 있다. 원심모형실험에서는 높은 중력 값이 시험 중 유지되어 원심기에 진공발생 장치의 직접설치는 고려되지 않았다. 대신 원심모형시험기 아래의 기계실에 진공발생장치를 설치하였다. 진공발생장치는 폴리에틸렌 튜브에 의해 솔레노이드 스위치 박스와 연결하였다.

실험 후 준설퇴적도로부터 오염원의 이동을 분석하기위한 코어 샘플러는 직경 1.9cm의 아크릴 튜브를 사용하여 만들었으며 튜브의 끝은 날카롭게 처리하여 샘플링이 쉽도록 하였으며 피스톤 압입 방식에 의해 샘플을 하도록 만들었다. 진공을 이용하여 튜브안에 채취된 샘플이 유지되도록 하였으며, 채취된 샘플은 포장후 4°C에 저장되었다.

5. 실험 과정 및 조건

5.1 실험 과정

먼저 모델상자 안쪽은 Dow Corning사의 510 실리콘을 얇게 코팅하여 시료와의 벽면 마찰을 줄이고 TCDD가 벽면에 붙는 것을 감소시켰다. 두 종류의 퇴적토와 캡핑재료가 각각 폴리에틸렌 주머니에 담아 모델상자안에 원하는 높이와 위치가 되도록 주머니 한쪽에 구멍을 뚫어 하중을 재하하면서 토층을 형성하였다. 캡핑재료 포설한 후 캡층 모래의 간극을 최소화하기 위해 이온을 함유하지 않은 물을 뿌렸다. 캡층위의 물은 농도의 변화를 보기위해 실험중 4, 5, 9, 13.5, 18 시간 간격을 두고 채취되었다. 여기서 모델상자에 설치된 두개의 준설퇴적층(그림 3 참조) 중 2번째 층(윗부분에 위치)만 오염원을 함유하고 있다. 실험 후 시료 채취는 이미 장비부분에서 언급된 코어샘플채취기를 이용하여 모델상자로 부터 채취하였다. 분석을 위한 시편은 Carl Zeiss사의 마이크로톰 HM 440기를 이용하여 얇은 절편을 만들어 함수, 염료 농도, TCDD농도에 대해 실험이 실시되었다.

5.2 실험 조건

Arulanandan et al.,(1988)이 제안한 방법이 Darcy 법칙이 유효한 흐름영역을 결정하기위해 사용되었다. 만약 Reynold수가 1이 경우, 가속도의 최대 증가 비율(N_{max})은 다음과 같다.

$$N_{max} = \frac{v \cdot n}{a \cdot k} \cdot i \quad (1)$$

여기서, v , d , n , k , i 는 각각 유체운동점성, 흙의 유효직경, 간극률, 투수계수, 동수경사를 나타낸다. 만약 동수경사를 1이라고 하고 운동점성을 $10^{-6}m^2/sec$ 라 가정하고 표 2에 제시된 재료의 물성치를 이용하면 Darcy 법칙이 유효한 가속도 범위는 258이하이다. 본 시험에서 Peclet수는 1보다 크며 이것은 유체분산이 속도의 함수임을 나타낸다. 표 4는 본 실험에서 사용된 모형실험 조건과 원형의 관계를 나타낸다. 앞의 결과에 의해 가속도의 범위는 100으로 하였다.

표 4 실험 조건 : 원형 vs. 모델

Boundary Conditions	Test 1	Test 2
Centrifuge Acceleration (g)	100	100
Model Cap Thickness (cm)	3	3
Prototype Cap Thickness (cm)	300	300
Model Sediment Thickness (cm)	9	9
Prototype Sediment Thickness (cm)	900	900
Prototype Area (m ²)	1385	248.3
Test Duration (hr)	22.5	22.5
Prototype Time (years)	25	25

6. 실험 결과

6.1 원심모형실험 1

원심모형실험 1은 준설퇴적토와 캡핑재료의 압밀특성을 결정하기위해 실시된 것이다. 그림 3(b)의 모델상자가 실험에 사용 되었으며 초기 함수비 110%의 준설퇴적층을 만들고 초기 압밀 후 캡층이 설치되었다. 그림 4는 원심모형 실험을 이용한 압밀실험 결과로 LVDT 계측 결과 총 침하량이 2.65cm (원형 265cm)로 나타났다. 육안 분석결과도 보면 원심모형실험 결과 후 전체 층(캡층+ 퇴적토층)의 두께가 9.4cm로 2.6cm가 감소한 것으로 나타나 LVDT 측정 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다. 실험 후 퇴적토로부터 채취된 시료는 마이크로 톱에 의해 얇은 절편으로 잘라서 분석되었다. 그림 5는 채취된 샘플에 대한 함수비 분석 결과로 캡층과 퇴적토층별 함수비의 관계를 나타낸다. 캡층의 범위는 0 ~ 3cm이고, 퇴적토층의 범위는 3 ~ 9.4 cm에 위치한다. 이 그림에 의하면 함수비가 감소한 것으로 알 수 있는데 이것은 간극수가 퇴적층으로부터 캡층을 통해 이동했기 때문이다.

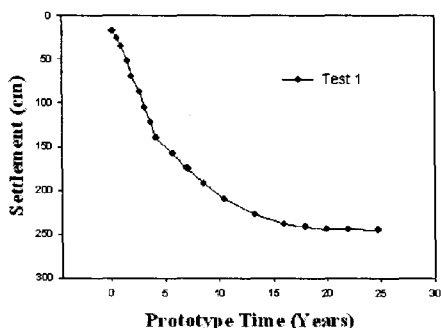


그림 4. 원심모형실험결과 : Test 1

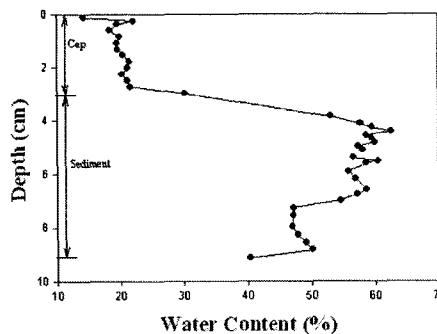
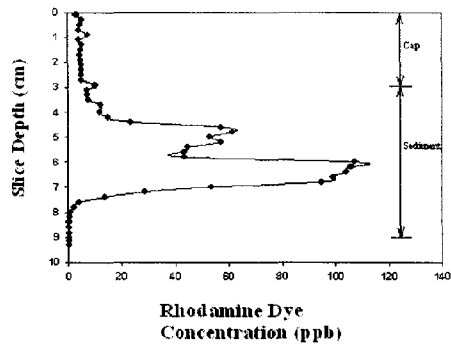
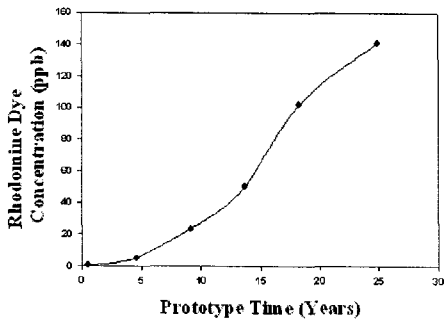


그림 5. 함수비 분포 : Test 1

그림 6(a)는 원심모형실험에서 모래층위의 물의 Rhodamine 염료의 농도를 원형시간으로 나타낸 것이다. 염료의 농도가 시간이 증가함에 따라 증가함을 할 수 있다. 이것은 간극수가 퇴적토층으로부터 캡층을 통해 이동하는 것을 의미한다. 또한 염료의 농도가 지체하는 시간 없이 즉각적으로 통과되는 것으로 나타나 이류가 오염원 이동의 주요한 원인을 알 수 있다. 그림 6(b)는 실험 후 채취된 샘플의 Rhodamine 염료의 농도분포로 예측한대로 퇴적층에서의 농도가 캡층에서 보다 많음을 알 수 있다.



(a) Rhodamine 염료 농도 변화

(b) Rhodamine 염료 농도 분포

그림 6. 원심모형실험에 의한 이루어진 간극수의 Rhodamine 염료 농도

6.2 원심모형실험 2

원심모형실험 2는 압밀에 의한 TCDD의 이루어짐을 관찰하기 위해 실시됐다. 안전상 이유로 시료의 침하량 측정 없이 실험이 실시하였다. 그림 7은 TCDD농도의 시간에 따른 변화로 원심모형실험중에 캡 층위의 물을 채취하여 분석한 결과이다. 그림 7에서 준설퇴적토로부터 이동된 TCDD의 최대 농도 수치인 0.024 $\mu\text{g/l}$ 가 검출되는데는 약 18년의 시간이 소요됨을 알 수 있다. 그림 8은 실험 후 채취된 3개의 퇴적토에 대한 평균 농도 분포를 층별로 나타낸 것으로 거의 모든 TCDD가 퇴적층에 잔류해 있음을 알 수 있다. 이 결과는 극히 적은양이 압밀에 의해 TCDD가 간극수의 이루어짐에 의해 일어난다는 것을 나타낸다.

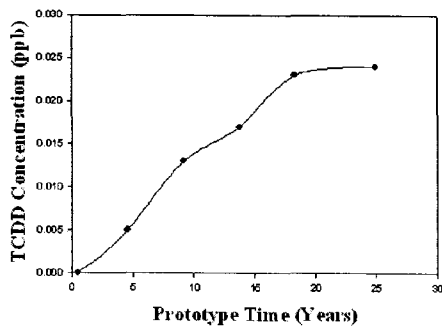


그림 7. 시간에 따른 TCDD 농도 변화

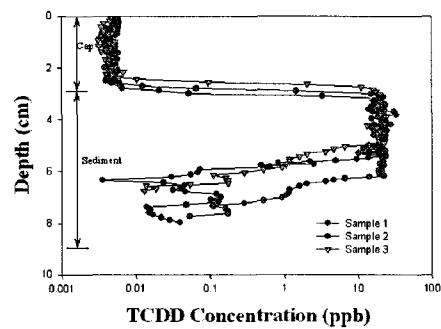


그림 8. TCDD 농도 분포

7. 결론

- (1) 캡이 설치된 준설퇴적토에서 캡층 설치 전후의 압밀에 의한 오염원의 이루어짐이 원심모형실험을 통해 확인되었다.
- (2) 극히 적은 양의 오염원이 준설퇴적토로부터 캡층을 통과해서 유출되는 것으로 나타나 캡층의 포설이 오염된 준설토로부터 오염원의 유출을 차단하는데 효과가 있음을 알 수 있다.
- (3) 오염원이동과 같은 지반환경적인 특성의 연구에 원심모형실험이 효과적으로 이용될 수 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

1. Arulanandan, K., Thompson, P.Y., Kutter, B. L., Meegoda, N.J., Muraleetharan, K.K., and Yogachandran, C. (1988). "Centrifuge Modeling of Transport Processes for Pollutant in Soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 144, pp. 185-205.
2. Cargill, K.W. and Ko, H.Y. (1983). "Centrifugal Modeling of Transient Water Flow," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 4, pp. 536-555.
3. Cooke, A.B. and Mitchell, R.J. (1991). "Evaluation of Contaminant Transport in Partially Saturated Soils," *Centrifuge 91*, H.Y. Ko and F.G. McLean (Ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 503-508.
4. National Research Council (NRC). (1997). *Contaminated Sediment in Ports and Waterways: Cleanup Strategies and Technologies*, National Academy Press, Washington, D.C, p. 295.
5. Palermo, M., Maynard, S., Miller, J., and Reible, D.D. (1998). *Guidance for In-Situ Subaqueous Capping of Contaminated Sediment*. EPA 905-B96-004. Great Lakes National Program Office, Chicago, IL.
6. Thibodeaux, L.J., Reible, D.D., Bosworth, W.S., and Sarapas, L.C. (1998). *A Theoretical Evaluation of the Effectiveness of Capping PCB Contaminated New Bedford Harbor Sediment*. Hazardous Substance Research Center Final Report. Louisiana State University. Baton Rouge, LA.
7. Thoma, G.J., Reible, D.D., Valsaraj, K.T., and Thibodeaux, L.J. (1993). "Efficiency of Capping Contaminated Sediments in-Situ: 2. Mathematics of Diffusion-Adsorption in the Capping Layer," *Environmental Science and Technology*, Vol. 27, No.12, pp. 2412-2419.
8. U.S. Army Corp of Engineers and U.S. Environmental Protection Agency. (1992). *Evaluating Environmental Effects of Dredging Material Management Alternatives-A Technical Framework*. EPA 842-B-92-008. Washington, D.C.
9. Villar, H.P. and Merrifield, C.M. (1994). "Experimental Aspects of Modeling of Migration Phenomena," *Centrifuge94*, Balkema, Rotterdam, pp. 363-368.
10. Wang, X.Q., Thibodeaux, L.J., Valsaraj, K. and Reible, D.D. (1991). "The Efficiency of Capping Contaminated Bed Sediments in Situ. Lab-scale Experiments on Diffusion/Adsorption in the Capping Layer." *Environmental Science and Technology*, Vol. 25, No. 9, pp. 1578-1584
11. Zimmie, T.F., Mahmud, M.B., and De, A. (1994), "Acceleration Physical Modeling of Radioactive Waste Migration in Soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 683-691.