

## 2차원 분리퇴적에 의한 준설토의 성상에 관한 연구

### A Study on the Property of Dredging Soils Stratified by Two dimensional Segregating Sedimentation

김형주<sup>1)</sup>, Hyeong-Joo Kim, 심민보<sup>2)</sup>, Min-Bo Shim, 전해선<sup>3)</sup>, Jeon Hye-Sun, 이민선<sup>4)</sup>, Min-Sun Lee, 백필순<sup>5)</sup>, Pil-Soon Paek, 최대일<sup>6)</sup>, Dae-Il Choe

<sup>1)</sup> 군산대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Civil & Environmental Eng., Kunsan National Univ.

<sup>2)</sup> (주)평원엔지니어링 이사, Director, Pyeongwon Engineering Co., Ltd.

<sup>3) 4) 5)</sup> 군산대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Civil & Envi. Eng., Kunsan National Univ.

<sup>4)</sup> 군산대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Civil & Envi. Eng., Kunsan National Univ.

**SYNOPSIS :** Two dimensional diffusion model test was conducted to investigate the sedimentation properties and consolidation process of reclaimed ground using dredging coarse soil which is composed of passing amount 20 percentage and 45 percentage of #200 sieve size respectively. The passing amount of #200 sieve size affected on sedimentation properties. The coarse soil which is passing amount of 20 percent showed that the sedimentation structure was layered type and passing amount of 45 percentage was wall-partition type according diffusion distance. Furthermore, the water content of surface and section, and distribution of fine soil were changed according to diffusion distance. and the change amount of pore water pressure and strength property when soil is diffused, segregated and accumulated can be applied efficiently in design of dredging and reclamation.

**Keywords :** Two dimensional diffusion model test, Dredging coarse soil, Sedimentation properties, Diffusion distance, Percentage of #200 sieve. Pore pressure, Vane strength.

## 1. 서 론

준설매립공사는 해저 퇴적점토를 준설하여 용지 확보와 박지준설까지 겸용하고 있다. 이러한 퇴적점토에 대한 1차원 체적변화연구는 주로 김형주 등(1999, 2003)과 유남재 등(1998), 이송(2002), 矢野(1985)에 의해 연구되어 왔다. 그러나 최근 준설환경의 변화에 의해 호안저부의 기초준설 및 선박의 정박을 위한 항만기능 유지등을 위해 준설심도가 크게 증가함에 따라 상부 점토층 하부에 퇴적된 중간토 성질을 띠고 있는 미고결 조립 실트층까지 준설이 필요하다. 따라서 조립토층이 매립지에 투입되는 경우 이수상태에서 수평으로 확산되기 때문에 비균질 매립지반이 형성되고 있다. 그러므로 분리퇴적현상에 의해 준설지반과 매립지반의 성상은 매우 다르게 조성되므로 매립지반의 특성을 일률적으로 예측하기가 어렵다. 더 나아가 준설토는 조립토의 함유율에 따라 투입함수비도 크게 500%~1200% 정도로 변화하고, 또한 배사관의 위치 및 입경, 투입속도, 매립지 면적, 매립고등이 침강 및 퇴적특성에 크게 영향을 미치고 있다.

본 연구는 과거 군장 국가공단조성시 펌프준설이 이루어진 지역에서 채취된 실트를 #200체 통과율 20%와 45%로 되도록 각각 조정하여 2차원 확산 퇴적 모형실험을 실시하였다. 실험결과에 의해 매립지반의 퇴적성상이 예측 가능하게 되었고, 토지이용 및 구조물 설치계획을 효율적으로 수립할 수 있도록 준설기법을 제시하였다.

## 2. 준설토 2차원 확산 퇴적 모형실험

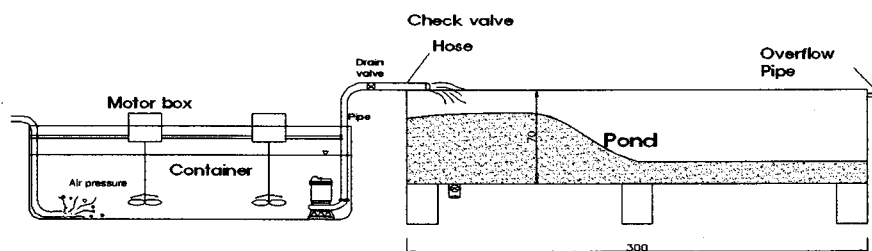
[그림 1]은 준설토 2차원 확산 퇴적 모형실험장치로 실제 현장의 펌프준설과 유사하게 슬러리 투입시 확산 퇴적되도록 제작되었다. 또한 투명아크릴에 의해 퇴적고 측정이 가능하도록 스케일과 간극수압계와 토압계를 설치하여 퇴적시 압밀과정을 파악하도록 하였다.

본 연구에 사용된 시료 및 실험조건은 [표 1]과 같이 군산신항만 준설현장에서 채취된 조립시료로 #200체 통과율이 약 20%~45%이며 실트질 모래(SM)로 분류된다. 먼저 현장 배사관 이송 함수비를 평균 700%와 #200체 통과율이 20%, 45%가 되도록 입도를 조정하였다.

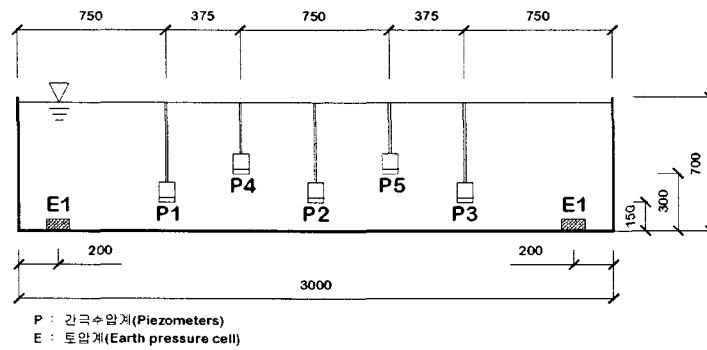
준설토 투입량은 직경 1.5cm의 이송호수를 통하여 투입함수비가 700%, 투입량은 0.59m<sup>3</sup>/hr로 일정하게 투명 확산퇴적토조(70cm×300cm×70cm)에 투입하였다. 준설토를 단계별로 투입하여 자유침강이 종료한 후에 표면수를 제거하고 차단계 준설토를 투입하는 과정을 반복하여 연속적으로 4단계(#200체 통과율 45%는 8단계)까지 투입하였다.

[표 1] 2차원 확산 퇴적 모형실험 시료 및 실험조건

자연함수비(%)	액성한계(%)	소성한계(%)	비중	#200체(%)	USCS
17.4	-	NP	2.695	10~30	SP-SM
투입함수비(%)	투입속도(m/min)	투입량(m <sup>3</sup> )	단계별 소요시간(min)	단 계	조정#200체(%)
700	0.74	0.63	180	4단 8단	20 45



[그림 1] 준설토 2차원 확산 퇴적 모형실험장치



[그림 2] 측정계기 설치단면

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 침강특성

가. #200체 통과율 20%, 45%의 침강특성

[그림 3]은 #200체 통과율 20% 준설토를 이용하여 단계별 투입시 최종계면고를 확산거리에 따라 표시하였다. 단계별 투입시 퇴적고는 투입지점부터 서서히 상승하고 3단계부터는 투입지점부근(0~60cm)에서 크게 상승되고 있다. 그리고 세립토가 퇴적되는 지역에서는 일정하게 상승되고 있다. 이러한 퇴적고상승의 차이는 조립모래와 세립토가 투입지점을 경계로 전면에서는 조립토가 퇴적되고 후면에서는 세립토가 퇴적되는 분리퇴적현상에 의해 퇴적층 입도성상이 다르게 퇴적되기 때문이다.

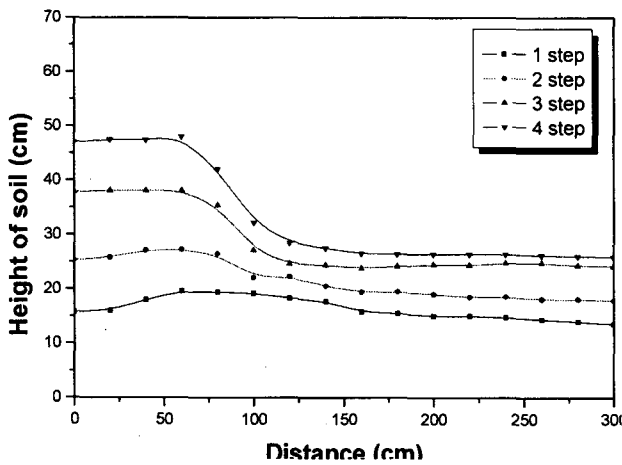
[그림 4]는 #200체 통과율 45%준설토에 대한 단계별 최종 계면고로 통과율 20%와 같이 단계별 투입에 의해 계면고가 투입지점으로부터 서서히 상승되면서 4단 투입부터는 완전한 분리 퇴적에 의해 투입지점은 조립토의 퇴적으로 계면고가 크게 상승되고 있으며 수평거리가 증가 할수록 세립토 퇴적으로 통과율 45%와 유사한 침강특성을 나타내고 있다. 그리고 실질토량고가 증가할수록 분리퇴적층의 사면형성각도 증가되고 있으며, 전반적으로 분리퇴적에 의해 퇴적고 상승은 다르게 나타나고 있다.

나. 단계별 투입시 누가 퇴적고 상승

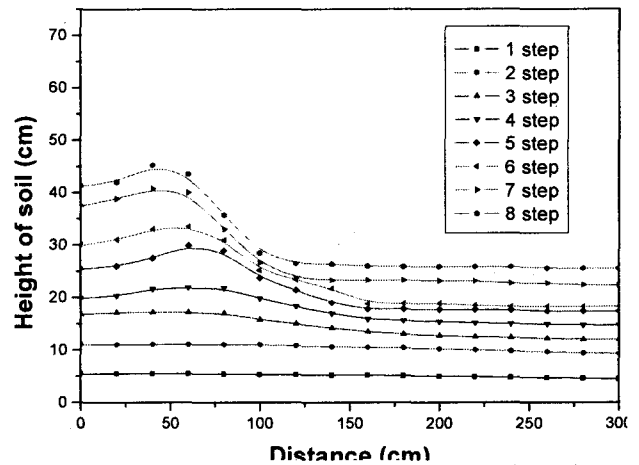
[그림 5~6]은 #200체 통과율 20%와 45%의 준설토에 대한 투입 위치에서 확산거리 40cm, 160cm, 280cm 지점에서 측정된 단계 투입시 누가 퇴적고 곡선을 나타내고 있다. 단계 투입횟수가 증가하면서 조립토가 퇴적된 40cm 지점은 일정하게 증가되고 있으나 세립토가 퇴적된 160cm, 280cm 지점에서는 지중압밀침하량이 증가되고 있다. #200체 통과율 20%의 경우 세립토가 적기 때문에 침강이 빠르게 종료되고 있으나 #200체 통과율 45%는 침강량이 크게 증가되고 있다. #200체 통과율 20%는 45%보다 투입량이 증가할수록 퇴적고가 빠르게 증가되는 것은 분리퇴적에 의해 조립토의 퇴적이 증가되기 때문이다.

다. 분리 퇴적사면 구배

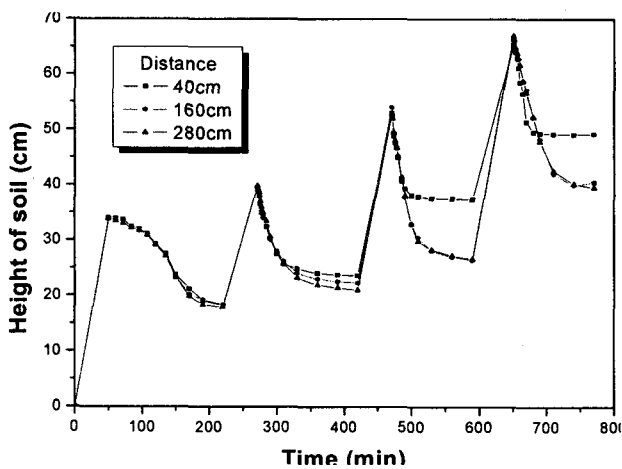
[그림 3~4]에서 #200체 통과율 20%와 45%에 대한 3단계 투입시를 기준으로 하여 퇴적사면 경사각을 측정한 결과 #200체 통과율 20%의 경우는 안식각이 8°이고 45%의 경우는 개략적으로 13°를 형성하고 있다. 또한 #200체 통과율 20%와 45%는 분리퇴적사면이 종료되는 지점은 모두 약 125cm지점을 경계로 하고 있다. 따라서 #200체 통과율은 퇴적사면 형성각에 영향을 미치고 있으며 세립층의 계면고 상승은 투입토량에 비례하고 있다.



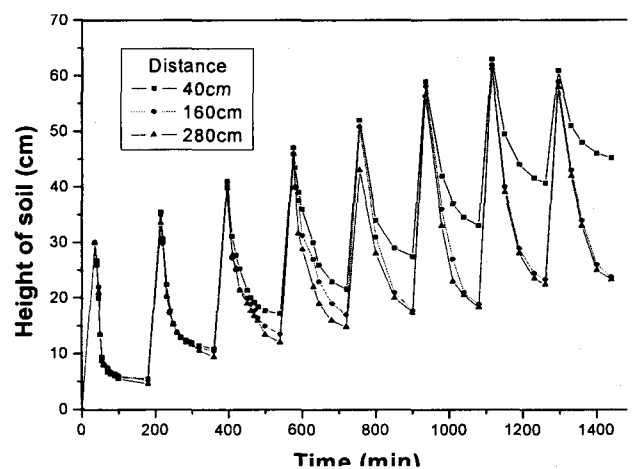
[그림 3] #200체 통과율 20% 준설토 단계별 퇴적상태



[그림 4] #200체 통과율 45% 준설토 단계별 퇴적상태



[그림 5] #200체 통과율 20%준설토의 퇴적고 변화

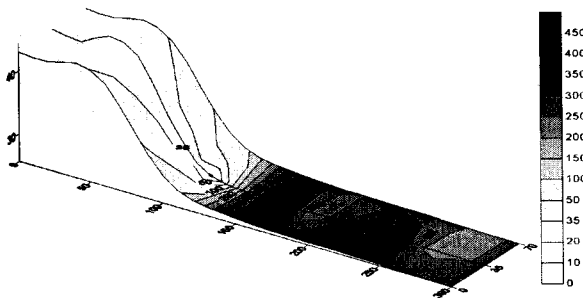


[그림 6] #200체 통과율 45%준설토의 퇴적고 변화

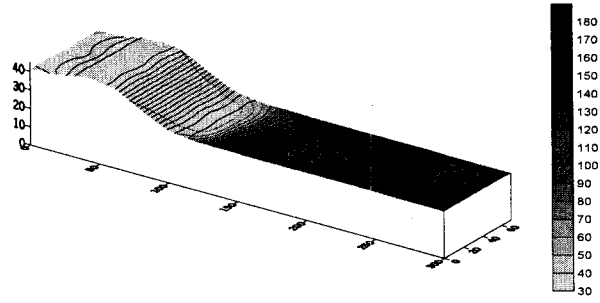
### 3.1.1 확산퇴적시료의 함수비 분포

[그림 7~8]은 #200체 통과율 20%와 45%의 준설토에 대한 자중압밀 종료시 퇴적된 시료의 상등수를 모두 제거한 후 총 163개소에서 측정된 표면함수비를 3차원으로 [그림 7]에 표시하였고, 단면 함수비를 2차원으로 [그림 8]에 각각 나타내었다. [그림 7]의 #200체 통과율 20%의 표면함수비 분포는 완전한 분리퇴적에 의해 통과율 45%보다 함수비가 일부지역에서는 크게 나타나고 있다. 다소 미세립 입자가 확산 거리에 따라 순차적으로 침강되지 않고 급격한 분리 퇴적시 와류의 영향에 의해 이동되어 퇴적되기 때문이다.

한편 [그림 8]의 #200체 통과율 20%와 45%의 준설토에 대한 단면함수비에서 #200체 통과율 20%는 층상간의 급격한 함수비 변화를 나타내고 있지만 통과율 45%의 경우는 확산거리가 증가되면서 세립토가 일정하게 퇴적되어 상부층으로 진행될수록 함수비가 서서히 감소하고 변화가 작으면서 일정하게 퇴적되고 있다.

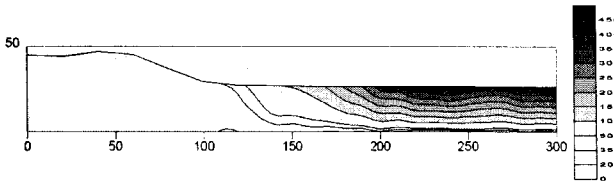


(a) #200체 통과율 20%

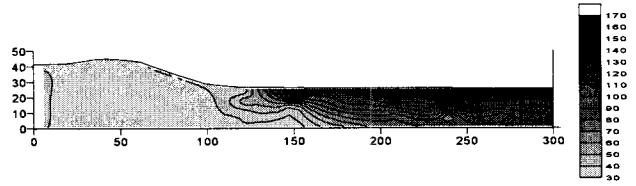


(b) #200체 통과율 45%

[그림 7] 퇴적층의 표면 함수비 분포



(a) #200체 통과율 20%



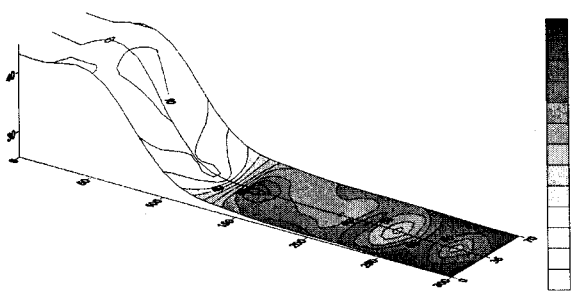
(b) #200체 통과율 45%

[그림 8] 퇴적층의 높이별 함수비 분포

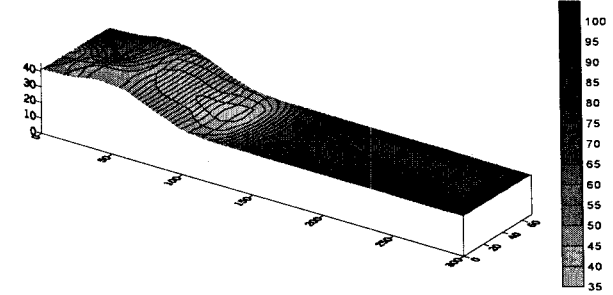
### 3.1.2 확산퇴적층의 세립토 함유량 분포

[그림 9~10]은 #200체 통과율 20%와 45%의 준설토에 대하여 각 위치에서 채취된 시료를 이용하여 #200체 통과율 실험을 각각 실시하였다. [그림 9]는 퇴적된 시료의 표면의 #200체 통과율을 나타내었고, [그림 10]은 단면에 대하여 #200체 통과율을 표시하였다. [그림 9(a)]에서 통과율 20%는 급격한 퇴적분리에 의해 미세립 입자의 분포비율이 비규칙적으로 퇴적되고 있다. 또한 [그림 9(b)]의 통과율 45%는 확산 거리가 증가하면서 동시에 #200체 통과율이 확산거리에 따라 증가되고 있다. 따라서 준설토의 입도구성에 따라 분리시 표면의 입도구성이 다르게 나타나고 있다.

한편 [그림 10]의 단면도를 보면 #200체 통과율 20%는 세립토가 층상구조를 이루면서 퇴적되고 있지만 통과율 45%는 확산거리가 증가하면서 격벽순으로 미세립 입자가 퇴적되고 있다. 따라서 준설토는 통과율에 따라 확산퇴적시 층상구조가 다르게 나타나고 있다.

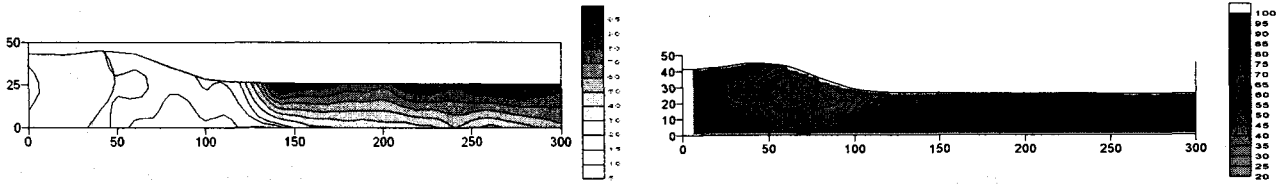


(a) #200체 통과율 20%



(b) #200체 통과율 45%

[그림 9] 표면 #200체 통과율 분포

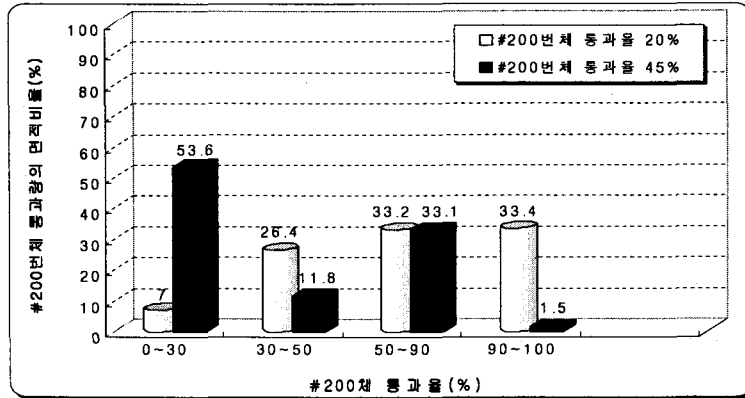


(a) #200체 통과율 20%

(b) #200체 통과율 45%

[그림 10] 높이별 #200체 통과율 분포

[그림 10]의 #200체 통과율 단면분포곡선을 이용하여 200번체 통과율에 대한 분포비율을 구해 [그림 11]에 표시하였다.

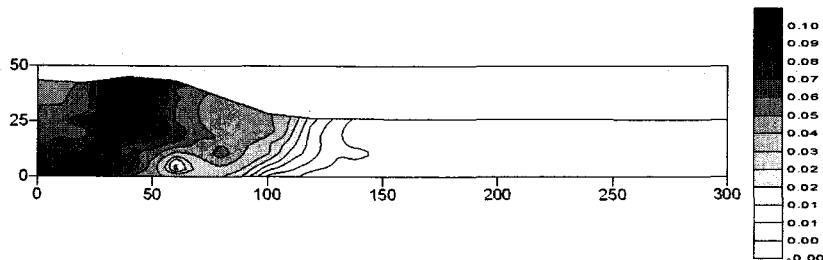


[그림 11] 확산 퇴적 후 #200체 통과율 점유 면적비

#200체 통과율 20%의 준설토는 확산퇴적 후 #200체 통과율 30%까지는 전체 확산 면적의 53.6%를 차지하고 30~50%의 범위는 11.8%, 50~90% 범위는 33.1%를 점유하고 있다. 그리고 퇴적층의 #200체 통과율이 50% 이하를 차지하는 점유 면적은 준설토면적의 65.4%이다. 한편 #200체 통과율 45%의 확산 실험결과 그림과 같이 #200체 통과율 50% 이하는 33.4%, 50~90%는 33.2%, 90% 이상은 33.4%를 점유하고 있다. #200체 통과율 20%의 경우 통과율 50% 이상 지역이 66.6%를 차지하고 있어 분리 퇴적에 의해 조립토와 세립토의 점유면적이 매우 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 체적비율은 준설토 매립시 분리 퇴적층의 침강 압밀특성 지역의 설정에 크게 도움이 될 것으로 판단된다.

### 3.1.3 배인강도 특성

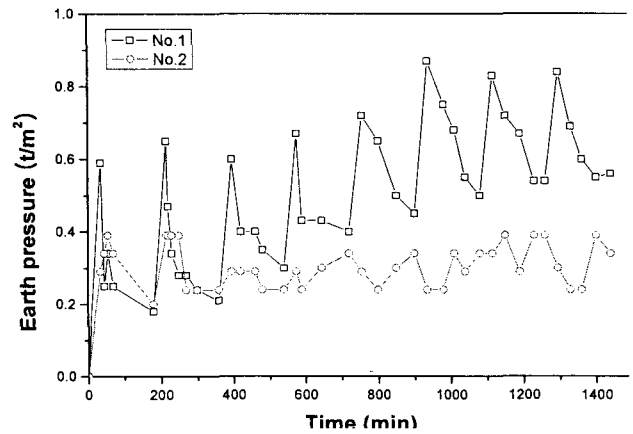
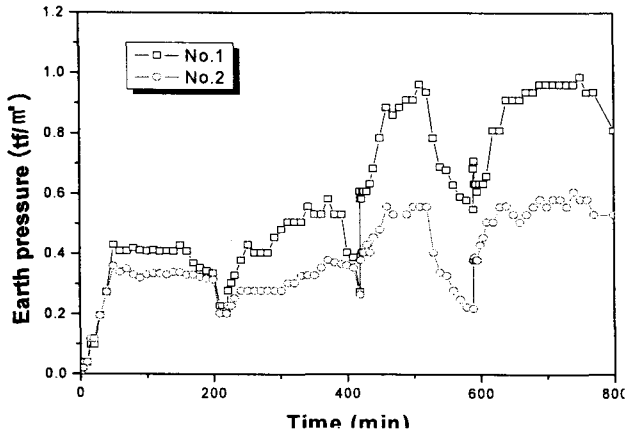
[그림 12]는 #200체 통과율 20% 시료의 2차원 확산 퇴적 모형실험에 의해 단계투입 종료 후 자중압밀 종료시 퇴적된 시료에 대한 배인실험 결과이다. 배인강도는 최고 0.1tf/m<sup>2</sup>까지 나타났으며 함수비 분포 20%, #200체 통과율 50%보다 적은지역에서 배인강도가 측정 가능하며 그 이상에서는 세립토 분리 퇴적층의 고함수비의 영향으로 배인강도가 거의 제로에 근접하고 있음을 알 수 있다.



[그림 12] 퇴적층의 배인강도 분포(#200체 통과율 20%)

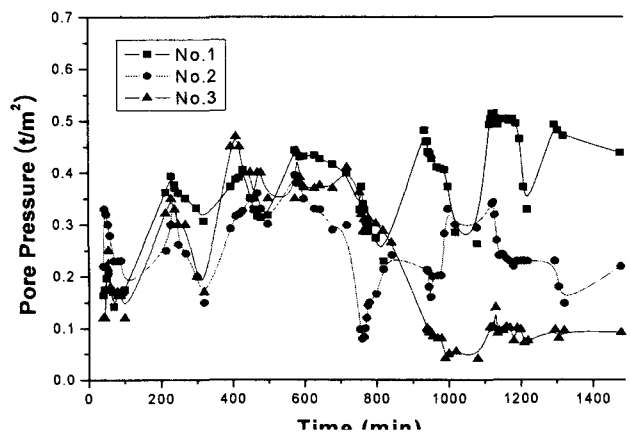
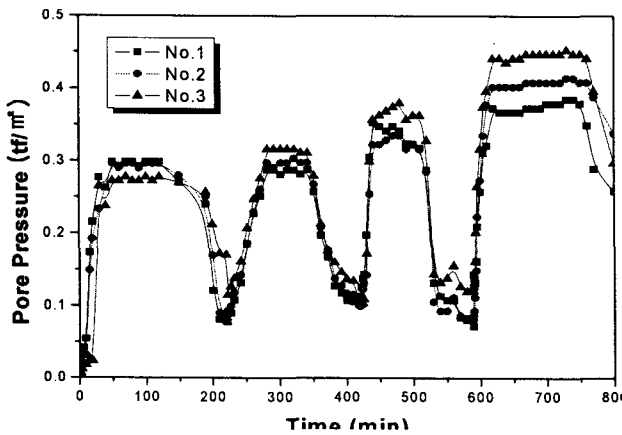
### 3.1.4 전응력 및 간극수압 분포

[그림 13, 14]는 아크릴 토조 하단에 슬러리 투입지점으로 20cm지점(No.1)과 끝에서 20cm지점(No.2) 2개소에 토압계를 설치하여 측정된 결과로 #200체 통과율 20%, 45%에 대하여 각각 나타내었다. 전응력은 퇴적층이 상승하면서 동시에 증가하고 있고 상층수의 제거시 수압의 감소로 전응력도 감소하고 있다. No.1지점과 No.2지점을 비교해서 보면 슬러리 투입지점인 No.1은 슬러리 투입에 대한 실질적인 토량이 증가하므로 전응력이 증가하고 있다. 그러나 투입지점부터 이격된 No.2는 세립토가 확산 퇴적되므로 전응력은 작게 나타나고 있다.



[그림 13] #200체 통과율 20%의 전응력측정 결과    [그림 14] #200체 통과율 45%의 전응력측정 결과  
 한편 [그림 15, 16]은 간극수압 변화로 총 3개의 간극수압계를 설치하여 시간에 따라 간극수압을 측정하였다. [그림 2]에서와 같이 No.1, 2, 3은 바닥으로부터 15cm 이격되게 설치하였으며 No.1은 아크릴 토조 중앙, No.2는 슬러리 투입지점에서 75cm 떨어진 지점, No.3은 아크릴 토조 끝부분에서 75cm 떨어진 지점에 설치하였다.

투입지점으로부터 15cm 이격된 간극수압 분포를 살펴보면 슬러리 투입시 정수압의 영향에 의해 간극수압이 크게 증가하며 투입량이 증가될수록 퇴적된 시료의 전응력 증가로 간극수압도 동시에 증가하나 단계 투입을 위해 상등수 제거시 함께 감소하고 있음을 알 수 있다. #200체 통과율 20%의 [그림 15]는 조립토가 많이 퇴적되어 배수영향으로 간극수압의 증감속도가 크다. 그러나 #200체 통과율 45%는 투입이 증가되고 시간이 증가할수록 각 확산거리별 간극수압변화가 큰 것은 세립토의 영향으로 배수속도가 다르기 때문이다.

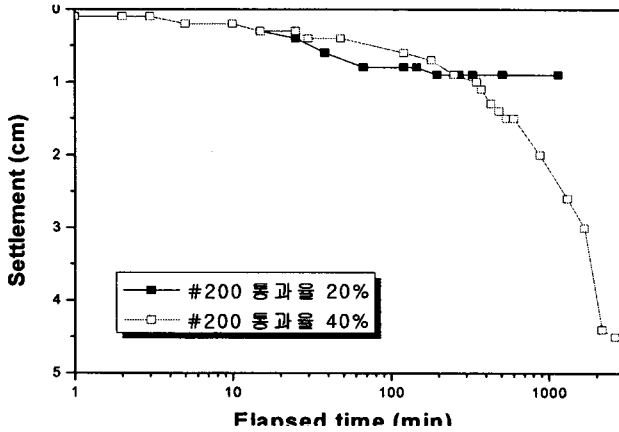


[그림 15] #200체 통과율 20%의 간극수압 측정결과

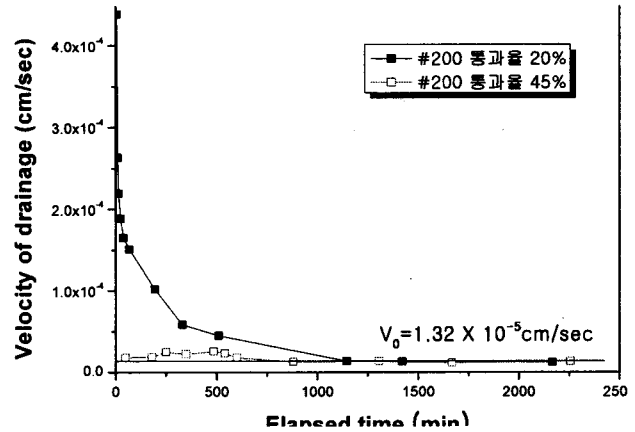
[그림 16] #200체 통과율 45%의 간극수압 측정결과

### 3.2 침투압밀에 의한 체적변화

[그림 17]은 액상점토의 체적변화를 구하기 위한 침투압밀 실험장치로 준설지역에서 채취된 액상시료를 자중압밀 함수비  $w_0=300\%$ 로 투입후 1일 동안 침투압밀 용기에 방치하였다. 그리고 수두차에 의해 재하를 하면서 용기 측면에 스탠드파이프를 설치하여 점토층 내부의 간극수압을 측정할 수 있도록 하였다. 자중압밀 개시시의 초기함수비  $w_0=300\%$ 의 액상점토의 두께 44cm, 침투수두를 380cm로 침투압밀실험 조건을 설정하여 침투압밀을 실시하였다.



[그림 17] 침투수압(3.8tf/m<sup>2</sup>) 작용시 시간-침하곡선



[그림 18] 침투압밀에 의한 배수속도(v)와 경과시간 관계

[그림 17]은 침투수압 작용시 #200체 통과율 20%와 45%에 대한 침하량과 시간 관계로 20%가 매우 압축량이 작게 나타나고 있어 조립토 함유율에 따라 매우 다른 압축특성을 나타내고 있다. 또한 [그림 18]은 배수속도와 시간 관계로 압밀 초기에는 배수속도가 다르나 시간이 경과할수록 상대적인 조립토의 함유량 영향으로 일정한 배수속도를 나타내고 있다.

[표 2] 침투압밀 실험조건

함수비(%)	시료높이H0(cm)	침투수두(cm)	#200체 통과율
300	44	380	20, 45

### 4. 결 론

본 연구는 매립지반의 퇴적성상과 압밀과정을 파악하기 위하여 준설 현장에서 채취된 조립준설토를 이용하여 #200체 통과율 20%와 45%가 되도록 각각 입도 조정하여 2차원 확산 퇴적 모형실험을 실시하였다. 실험과 분석을 통하여 아래와 같이 결론이 제시되었다.

1. 조립준설토는 #200체 통과율이 분리퇴적에 크게 영향을 미치고 있으며 조립토가 퇴적되는 투입지점은 실질토량이 증가 할수록 비례하여 퇴적고가 증가되고 세립토가 퇴적되는 지역은 침강특성을 나타내고 있다.
2. #200체 통과율 20%의 준설토는 45%에 비해 급격한 분리퇴적으로 인해 표면 및 층상에서 함수비 변화폭이 크다.



3. #200체 통과율에 따라 확산퇴적시 퇴적구조가 변화되고 있으며, 통과율 20%는 층상구조를 통과율 45%는 격벽층으로 퇴적되고 있다. #200체 통과율 20%의 준설토는 #200체 통과율이 50% 이하의 세립토가 준설투면적의 65.4%이고, 45%의 준설투는 33.4%를 차지하고 있다. 그리고 베인강도는 세립토가 퇴적된 지역은 거의 제로에 근접되고 있어 입도분포에 영향을 크게 받고 있다.

4. 준설투 투입시 전응력 및 간극수압은 투입토량이 증가될수록 증가되고 있으며 간극수압 소산속도는 세립토가 퇴적된 지역 일수록 서서히 감소하고 있다. 또한 #200체 통과율 45%의 준설투는 압밀응력작용시 체적변화가 20%보다 매우 크게 나타나고 있다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부(한국과학재단) 특정기초연구(과제번호:R01-2005-000-11088-0) 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 김형주, 이민선, 이용주, 김대우(2003), “준설투의 체적변화 및 2차원 퇴적특성에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제4호, pp.155~165.
2. 김형주, 오근엽(1999), “연약한 준설투매립 점성토 지반의 자중압밀 과정에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제2호, pp.129~138.
3. 유남재, 안중선, 이종호, 유병상(1998), “준설투매립토 지반의 체적변화량 예측”, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.307~310.
4. 이송, 전종구(2002), “조립토가 혼합된 준설투의 퇴적 및 압밀특성”, 한국지반공학지, 제18권, 제2호, pp.75~86.
5. 矢野弘一郎(1985), “浚渫泥土の分離堆積”, 土と基礎, Vol.32, No5, pp.23~28.