

## 펌프준설에 의한 준설토의 체적변화에 관한 연구

### A Study on Bulking Change of Dredged Soils by Pump Dredger

김찬수\* · 윤길림\*\* · 박흥규\*\*\*

Kim, Chan-Soo · Yoon, Gil-Lim · Park, Heung-Gyu

#### Abstract

When settled sediments in natural condition for long time were dredged by dredging process, it is natural that bulking change between sediments and dredged soils is affected by chemical injection; coagulant. Dredged sediments used in this study were sampled in the lagoon "Young rang lake" located at the east coast Sokcho city and the bulking change of dredged soils is quantitatively analysed by changing of the clay content and the amount of the flocculant and coagulant. From the experimental results, the bulking of dredged soils increased 1.69 times on the average bulking of settled sediments in natural condition in the case of the optimum chemicals addition.

**Keywords** : Dredged soils, Young rang lake, Bulking change, Flocculant, Coagulant

#### 요 지

오랜 기간동안 자연 상태로 퇴적되어 있는 퇴적토를 펌프준설의 방법으로 준설할 때, 안정상태의 퇴적토는 준설되는 과정에서 교란되어 침강을 촉진시키는 응결제 및 응집제를 투입하더라도 자연 상태의 퇴적토와 준설토 사이에는 필연적으로 체적변화가 발생한다. 본 연구는 동해안 속초에 위치한 석호인 영랑호의 준설토를 대상으로 실내실험을 하였으며, 준설토의 함수율 변화, 응집제 및 응결제 투입량 변화에 따른 체적변화율을 정량적으로 분석하였다. 실험결과 최적 약품첨가의 경우 준설토의 체적변화율은 평균 1.69배 증가하는 것으로 파악되었다.

주요어 : 준설토, 영랑호, 체적변화, 응결제, 응집제

\* 정회원 · 삼성물산(주) 속초영랑호 현장소장  
\*\* 정회원 · 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 책임연구원  
\*\*\* 정회원 · 관동대학교 공대 건설환경시스템공학부 교수

## 1. 서론

최근 우리나라 연안의 내항, 석호 및 댐은 상류지역이나 인근 유입하천에서 지속적으로 유입되는 다양한 물질의 침전과 퇴적현상으로 인하여 쌓인 오염된 퇴적토로 인해 수질 및 토양오염이 가중되는 등 환경오염이 심각한 수준이다. 이로 인한 해역의 부하량을 저감하기 위한 대책으로 환경기초시설 사업을 추진하고 있다. 대부분의 경우 저층 퇴적물을 제거하는 사업은 준설 작업에 의존하고 있는 실정이다. 준설은 항로유지준설 및 오염된 해역의 수질개선 목적으로 수행되고 있으며, 준설된 퇴적물은 외해에 투기하거나 매립 등의 방법으로 처분하고 있다.

준설 퇴적물을 매립하거나 투기하기 위해서 투기장 또는 침전조를 설계하는 과정에서 가장 중요한 인자는 준설토 발생량의 적정 산정이다. 저층 퇴적물을 준설하는 경우, 퇴적물의 미세한 입자가 부유되어 있는 상태로 장기간 유지되어 준설직후 매립 및 투기가 곤란하기 때문에 응집제, 응결제 등의 약품을 투입하여 부유물질의 침강을 촉진시키는 작업이 수행된다. 이 과정에서 약품 투입량의 영향과 자연상태인 교란되지 않은 퇴적물을 준설하는 과정에서 준설토의 체적은 변화하게 된다. 일반적으로, 체적이 증가하는 경향을 보이고 있는데, 준설토를 매립 투기하는 물량을 적절하게 산정하기 위해서는 저층에 있는 해저퇴적물의 체적을 기준으로 산정하는 방법보다 퇴적물을 준설하여 약품 투입 공정 등의 과정을 거친 후의 체적에 의거하여 매립장 또는 침전조 규모 및 준설토 투기량을 산정하는 것이 필요하다.

준설토의 체적변화율은 준설토를 투기장 또는 침전조에 투하할 때, 준설장비, 준설강도, 배사관 연장, 준설토사의 입경분포, 준설물질의 함수비, 수토장의 규모, 상재하중 등에 따라 차이가 난다. 또한, 유보율을 어떻게 적용하느냐에 따라라도 차이가 발생하나 계측이 어려운 요소가 많아 개략적인 변화율을 추정하는 것에 의존할 수밖에 없는 실정이다. 최근까지 국내에서 실측된 결과는 점토 및 실트질 준설토에 대하여 1.06에서 1.60정도의 체적변화율을 보이고 있다(부산지방해양수산청, 1999). 일본의 연구사례로는 Hatano 등(1996)과 Uchida 등(2002)이 준설점토의 체적변화에 대하여 펌프 준설직후 측정된 결과, 약품을 전혀 첨가하지 않은 상태에서 1.44정도의 체적변화율을 얻었다.

본 연구는 자연상태 퇴적물의 체적과 펌프 준설 후 준설

토의 체적변화 특성에 약품투입과 투입량이 미치는 영향을 검토하기 위하여 약품투입에 따른 준설토의 체적변화에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 준설 퇴적물 시료는 동해안 속초에 위치한 석호인 영랑호의 오염된 준설토를 사용하였으며, 준설토의 함수율 변화, 응집제 및 응결제의 배합 비율, 응집제 및 응결제의 투입량 변화에 따른 준설토의 체적변화 특성에 대해 실내실험을 통하여 분석 및 검토하였다.

## 2. 영랑호 수역의 특징

강원도 속초시에 위치한 영랑호는 우리나라의 대표적인 석호로써 현재는 지형적인 영향에 따른 호수의 하구 폐쇄 현상 및 호수 유출부의 7번 국도횡단, 주변 지역 개발 등으로 인해 해수 교환율이 저조할 뿐 만 아니라, 호저 퇴적토의 부영양화로 인한 수질 악화가 가중되고 있어 수질개선을 위한 준설공사 및 유입 오염원 차단을 위한 조치가 절실히 요구되고 있다.

또한 영랑호는 호수면적 1.024km<sup>2</sup>, 저수량 4백만톤, 평균수심 4m, 호안길이 7.5km 규모의 석호로써 우수 흐름 및 지형적인 특성에 따라 크게 3개의 영역으로 구분할 수 있다.

영역 I 과 II는 유입수의 우수 경로상에 있지 않고 우수의 흐름이 정체되는 구간으로써 영역 I 은 유입하천보다 상류지역에 위치하고, 영역 II는 인위적으로 출구를 차단하여 양어장으로 개발하여 활용한 지역으로써 현재는 사용하지 않고 방치된 곳이다. 오랜 기간동안 어패류 및 초목류, 생활 오수의 퇴적물 및 유기물이 부패 및 퇴적되어 있으며, 영랑호의 상류 지류인 장천으로부터 지속적으로 유입된 축산 폐기물도 부패 및 퇴적되어 2.0~3.0m의 오니 퇴적층을 형성하고 있다. 이 지층은 분류상 흙의 특성을 가지기 보다는 유기물 퇴적층으로 보아야 하며 자연상태로 호소 저면에 압밀, 퇴적된 경우에도 교질화(Gel) 상태이며, 외부의 물리적 영향으로 인해 물 등과 교란되었을 경우에는 현탁액(Sol) 상태로 변화하는 특성을 가지고 있다. 지층의 연경도(Consistency)는 매우 연약한 상태이며 표준관입 시험에 의한 N치는 대부분이 0으로 나타났고 색깔은 짙은 회색 또는 암회색을 띠고 있으며 습윤상태 또는 포화상태이다.

영역 III 구간에 퇴적되어 있는 퇴적물은 지속적인 유입수

의 유입 및 유수의 운반 퇴적작용으로 인하여 형성되었으며 퇴적토층(Alluvial Deposit)은 심도 3.0~7.0m 내외의 두께로 분포하고 있으며, 지층의 구성성분은 소량의 실트 섞인 세립 내지 조립의 모래층으로 구성되어 통일분류로는 SP로 구분된다. 표준관입시험에 의한 N치가 10~16회 정도으로써, 지층의 상대밀도는 중간정도의 조밀한 상태이며, 지층의 색깔은 갈색 내지 회갈색을 나타내고 있다. 영역Ⅲ은 SP로 분류됨에 따라 펌프준설에 따른 준설토 체적변화를 검토에서 적합하지 않은 토질로 판단되어 본 연구 영역에서 제외하였다.

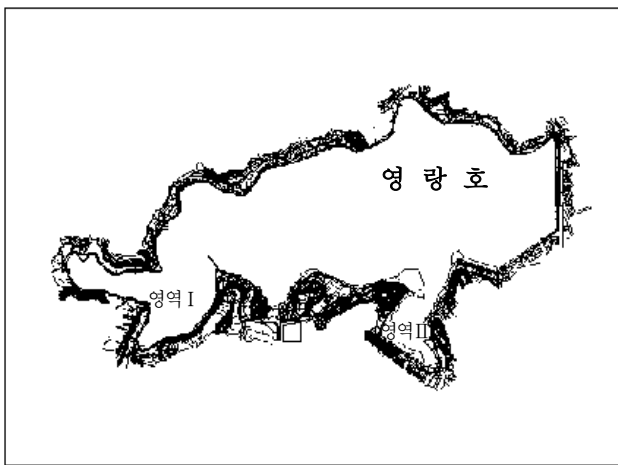


그림 1. 영랑호 수역특성에 따른 영역

### 3. 준설토의 공학적 특성

영역 I 과 영역 II 의 오니 퇴적토층의 심도 2.0~3.0m의 구간에서 채취한 시료를 실내 토질시험을 실시한 결과는 표 1과 같다.

표 1. 준설토의 토질특성

구분	영역	공번	함수비 (%)	비중	액성 한계 (%)	소성 지수 (%)	#200체 통과율 (%)	통일 분류	비고
I		A 1	173.3	2.49	125.3	60.5	96.5	OH	
		A 2	112.1	2.47	108.5	65.7	94.3	OH	
		A 3	223.6	2.44	136.3	76.4	96.1	OH	
II		B 1	102.4	2.59	48.9	15.3	91.4	OL	
		B 2	233.1	2.41	151.1	86.1	96.5	OH	
		B 3	236.2	2.38	158.7	83.5	94.6	OH	

용출조사는 영랑호에서 채취한 담수와 시료를 1:10

(W/V)의 비율로 혼합한 혼합액 500ml를 대상으로 상온, 상압에서 매분 200회 진폭으로 연속 6시간 진탕후 G/FC로 여과하여 검정용 시료로 사용하였다. 퇴적물 용출시험 결과를 표 2에 나타냈다.

표 2. 퇴적토의 용출시험 결과

(단위 : mg/kg)

영역	pH	강열 감량 (%)	T-N	T-P	Fe	Mn	Pb	CD
I	7.4 ~ 7.6	8.4 ~ 10.3	1,658 ~ 2,360	68 ~ 180	16.01 ~ 19.12	1.469 ~ 3.447	4.405 ~ 5.890	ND
	7.3 ~ 7.4	8.1 ~ 9.6	2,252 ~ 2,790	67 ~ 159	22.06 ~ 31.22	4.019 ~ 5.930	7.408 ~ 8.548	
II	7.3 ~ 7.4	8.1 ~ 9.6	2,252 ~ 2,790	67 ~ 159	22.06 ~ 31.22	4.019 ~ 5.930	7.408 ~ 8.548	ND
	7.3 ~ 7.4	8.1 ~ 9.6	2,252 ~ 2,790	67 ~ 159	22.06 ~ 31.22	4.019 ~ 5.930	7.408 ~ 8.548	

### 4. 시료토 및 실험방법

#### 4.1 시료토

체적변화율 분석을 위한 시료채취는 영랑호의 수역 특성에 따라 구분한 영역 I 과 II의 퇴적토를 사용하였다.

#### 4.2 실험 방법

영역 I 과 II에서 채취한 퇴적토는 영랑호에서 채수한 담수와의 체적비로 1:4(함니율 20%), 1:2(함니율 30%) 및 1:1.5(함니율 40%)의 3가지로 분류하여, 각각의 함니율에 대하여 고르게 혼합하여 고분자 응집제(MULTIPOL AE-4302) 및 응결제(STOPOL F-200) 약품을 투입한 후 시간별로 침강되는 오니의 체적을 측정하였다. 침전 오니층(침전층)과 청정층(상등수) 사이에 존재하는 계면(interface)의 시간변화를 관측하여 침전량 변화(체적변화)로 간주하였다.

오니침강 처리약품의 최적 투입량을 산정하기 위하여 함니율 20% 시료에는 응결제 투입량을 150ppm, 200ppm, 250ppm의 3가지 경우로 구분하였고 응집제는 응결제 함량마다 30ppm, 40ppm, 50ppm으로 배합하여 총 9가지의 경우로 조합하였고, 함니율 30% 시료에는 응결제 투입량을 250ppm, 300ppm, 350ppm의 3가지 경우로 구분하였고 응집제는 응결제 함량마다 50ppm, 60ppm,

70ppm으로 배합하여 총 9가지의 경우로 조합하였으며, 합니율 40% 시료에는 응결제 투입량을 300ppm, 400ppm, 500ppm의 3가지 경우로 구분하였고 응집제는 응결제 합량마다 60ppm, 80ppm, 100ppm을 배합하여 총 9가지의 경우로 조합하여 시험함으로써 전체 27가지 경우를 검토하였다. 시료와 약품을 교반후 정해진 시간대별로 침전오니의 체적과 여액의 탁도를 관찰하여 최적의 침강약품 적정 투입량을 선정하고 준설토 체적변화를 시험에 적용하였다.

체적변화율 시험은 현장의 펌프 준설토 교반조건을 고려하여 500ml 용량의 메스실린더(mass cylinder)를 이용하여 영역 I 과 II에서 채취한 자연상태 오니와 영랑호 담수를 혼합하여 각 합니율로 실험용 혼합오니를 준비하였다. 준비한 혼합오니는 선정된 적정 합량의 응결제와 응집제를 첨가하여 응결제 및 응집제 첨가시 마다 10회씩 위아래로 흔들어 교반하였다. 응집제 및 응결제 투입량 변화에 따른 체적변화 양상을 파악하는데 중점을 두고 실험실에서의 충분한 혼합을 가정하여 수행하였고 응결제와 응집제를 첨가하여 교반 후 시간에 따른 오니 침강시험을 위하여 진동이 없는 실험대 위에 놓았다. 이후 정해진 시간대별로 침전 오니의 체적 및 여액량을 20분 간격으로 최대 3시간까지 측정하였다. 이는 오니 준설통사의 준설투기까지의 공정 사이클 타임에 따라 침전조에 퇴적오니를 이송받아 약품처리 후 침전시킬 수 있는 최대시간이 2시간 50분이기 때문이다.(속초시청, 1996)

## 5. 시험결과 및 분석

### 5.1 약품 배합에 따른 침강효율 특성

합니율 20%, 30%, 40%별로 응결제 및 응집제의 배합 비율에 따라 전술한 27가지 혼합오니의 침강오니체적/초기오니체적비와 오니 침강시간과의 관계를 그림 2~4에 나타냈다. 준설토오니의 체적변화는 모든 합니율에 대해서 침강시간이 경과함에 따라 감소함을 알 수 있다. 특히 모든 경우에서 준설토오니의 침강개시 초기에는 급격한 침강오니의 체적감소가 발생하지만 침강개시로부터 약 30분이 경과하면서 그 감소는 완만히 진행됨을 알 수 있다. 한편 본 시험의 모든 합니율에 대해서 응결제와 응집제의 투입량의 차이에 따라서 침강오니의 체적감소량에 차이가 있음을 알

수 있다.

따라서 본 실험의 결과로부터 각각의 합니율에 대한 침강오니의 체적이 가장 작게 나타나는 적정 응결제와 응집제의 투입량을 결정할 수 있다. 응결제와 응집제의 투입량이 증가할수록 침강시간에 따른 침강오니의 체적감소 효과는 크게 나타났으나, 응결제 및 응집제를 적정량 이상 투입할 경우 오히려 침강오니 체적이 증가하였다. 이는 약품 투입량이 증가될 경우, 오니 입자의 크기가 상대적으로 커지며 이로 인하여 입자들 사이의 간극이 증가하여 침강오니 체적이 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 각 합니율에서 최소 침강오니 체적을 나타내는 적정 응결제와 응집제의 투입량은 합니율의 증감에 따라 최적 배합의 침강 약품 배합을 선정하였다.(표 3 참조)

표 3. 합니율별 최적 약품 투입량 결정

합니율(%)	최적 약품 투입량
20	응결제 200ppm + 응집제 40ppm
30	응결제 300ppm + 응집제 60ppm
40	응결제 400ppm + 응집제 80ppm

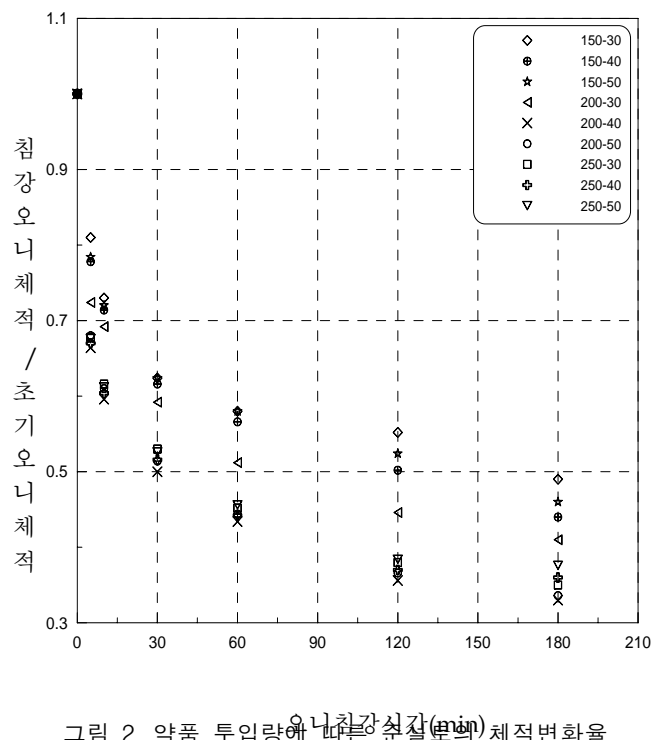


그림 2. 약품 투입량에 따른 준설토의 체적변화율 (합니율 20%)

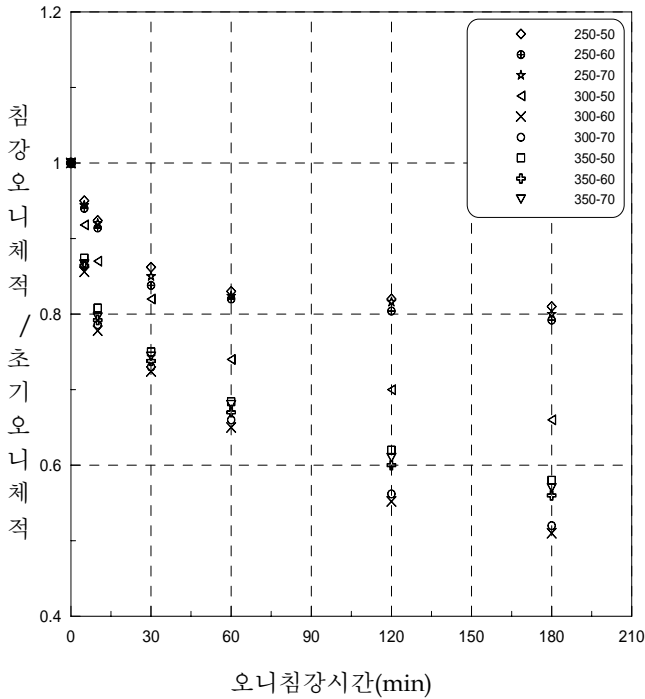


그림 3. 약품 투입량에 따른 준설토의 체적변화율 (함수율 30%)

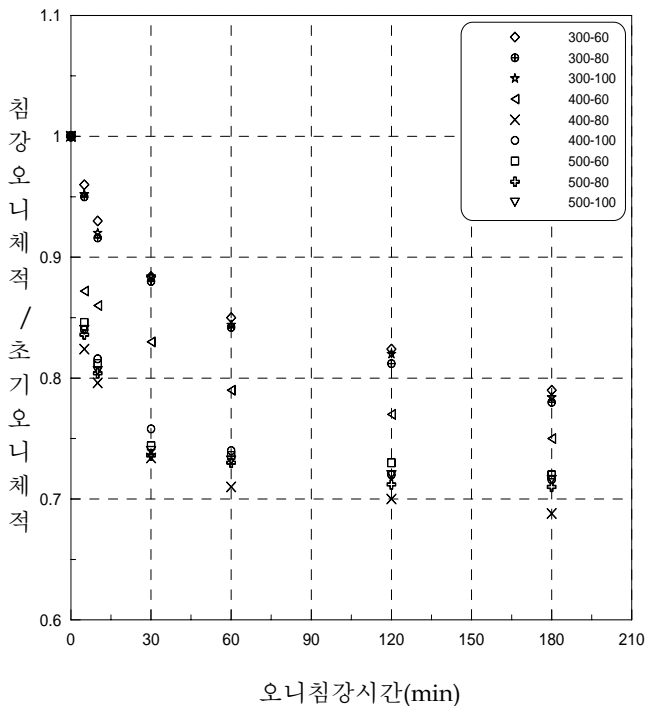


그림 4. 약품 투입량에 따른 준설토의 체적변화율 (함수율 40%)

## 5.2 약품투입에 따른 준설토의 침강속도 변화

그림 5와 6은 영랑호의 영역 I 와 영역 II에 대한 혼합오니의 침강시간에 대한 오니 체적의 변화를 나타내고 있다. 약품을 투입하지 않은 상태의 자연 침강상태는 침강 개시부터 침강속도가 완만하게 증가하며 약품을 투입한 경우에 비하여 상대적으로 느림을 알 수 있다. 또한 오니함량이 적을수록 혼합오니의 침강 속도가 빠르게 나타났다. 약품을 투입한 경우, 모든 오니함량에 대해서 침강 개시 후 약 30분 이내에 오니의 침강속도가 빠르게 증가하지만 그 이후의 침강속도는 약품을 투입하지 않은 경우와 같이 완만하게 증가함을 알 수 있다. 오니함량이 30%와 40% 경우는 침강개시후 약 30분까지의 침강속도는 거의 같은 경향을 보이지만, 그 외에는 오니함량이 적을수록 침강속도가 빠르게 나타났다. 따라서 약품 투입에 의한 오니의 침강속도 효과는 대부분 침강개시 후 약 30분 이내에 오니함량이 적을수록 현저히 발휘되며, 그 이후에는 약품을 투입하지 않은 상태의 자연 침강속도와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

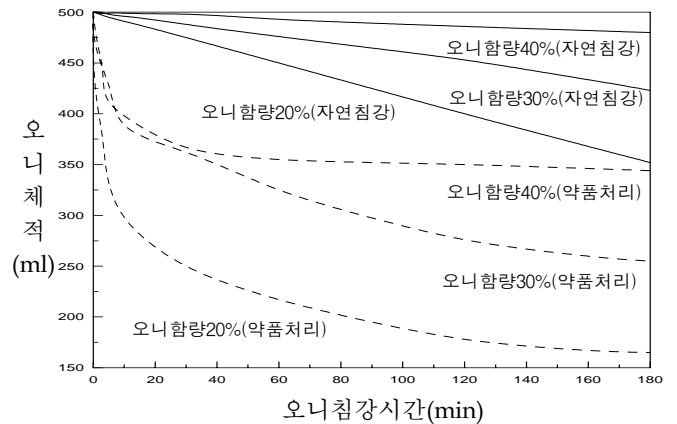


그림 5. 침강시간에 따른 준설토의 체적변화 (영역 I)

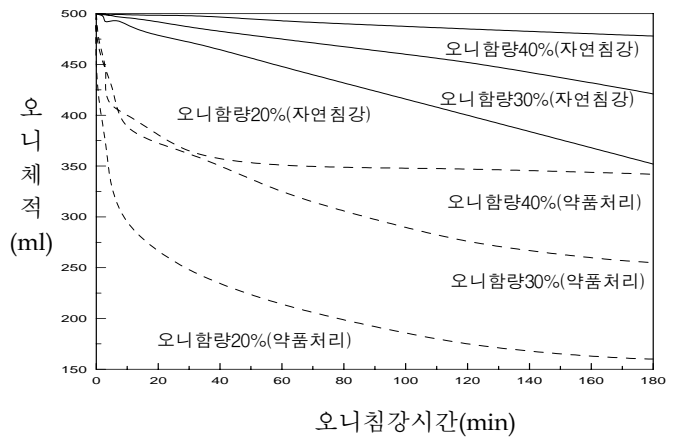


그림 6. 침강시간에 따른 준설토의 체적변화 (영역 II)

### 5.3 오니함량 변화에 따른 체적변화 특성

그림 5와 6에서 보이는 바와 같이 영랑호 수역의 혼합오니에 대해서, 약품을 투입하지 않았을 경우, 3시간후의 영역 I의 오니체적은 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 각각 352ml, 423ml 및 480ml 값을 보이고 있으며, 영역 II의 오니체적은 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 각각 352ml, 421ml 및 478ml 값을 보이고 있다. 따라서 지점에 따른 오니체적 변화는 큰 차이를 보이지 않고 있으며 오니함량이 증가함에 따라 오니체적 변화는 증가하고 있음을 알 수 있다.

약품을 투입하였을 경우, 동일한 방법으로 오니의 체적 변화를 분석하였다. 약품 투입 3시간 후의 영역 I의 오니 체적변화는 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 각각 165ml, 255ml 및 344ml 값을 보이고 있으며, 영역 II의 오니체적변화는 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 각각 160ml, 255ml 및 342ml 값을 보이고 있다. 따라서 약품을 투입하였을 경우에도 약품을 투입하지 않았을 경우와 마찬가지로 지점에 따른 오니 체적변화는 큰 차이를 보이지 않고 있으며 오니함량이 증가함에 따라 오니 체적변화는 증가하고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 영랑호 수역의 오니함량에 따른 준설오니의 3시간 후의 체적변화율(3시간후의 오니체적/자연상태의 오니체적)을 나타내고 있다. 약품을 투입하지 않았을 경우, 체적변화율은 시료를 채취한 지점에 관계없이 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 각각 약 3.52, 2.82 및 2.40의 값으로 오니함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 약품을 투입하였을 경우의 체적 변화율은 시료를 채취한 지점에 관계없이 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 각각 약 1.65, 1.70 및 1.72의 값으로 오니함량이 증가함에 따라 증가하는 경향, 즉 약품을 투입하지 않았을 경우와 반대경향을 보이고 있다.

### 5.4 약품 투입에 따른 체적변화 특성

약품을 투입하였을 경우와 투입하지 않았을 경우의 준설 오니의 체적은 매우 큰 변화를 보이고 있다(그림 7). 영역 I에서 채취한 시료에 대해서 약품을 투입하지 않았을 경우, 3시간 후의 오니체적은 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 각각 352ml, 423ml 및 480ml 값을 보이고 있으나, 약품투입시에는 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 오니체적은 각각 165ml, 255ml 및 344ml 값을 보이고 있다.

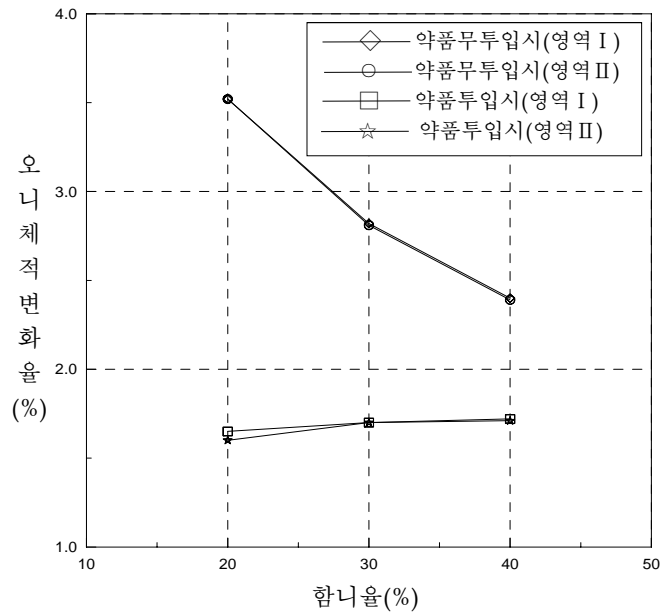


그림 7. 함니율에 따른 준설 오니 체적변화율

또한 영역 II에서 채취한 시료에 대해서 약품을 투입하지 않았을 경우, 오니체적은 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 각각 352ml, 421ml 및 478ml 값을 보이고 있으나, 약품투입시에는 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 오니체적은 각각 160ml, 255ml 및 342ml 값을 보이고 있다.

그림 8은 영역 I와 영역 II에서 채취한 시료에 대해서 약품투입에 따른 준설오니의 체적변화 특성을 나타내고 있다. 약품을 투입하지 않았을 경우의 오니체적에 대한, 약품을 투입하였을 경우의 오니체적비는 시료를 채취한 지점에 관계없이 오니함량 20%, 30% 및 40% 경우에 대하여 각각 약 0.46, 0.61 및 0.72의 값으로 오니함량이 증가함에 따라 증가하고 있다. 즉, 오니함량이 증가함에 따라 약품투입에 따른 체적변화율 차이가 작아짐을 알 수 있다. 따라서 약품투입에 의해서 준설오니의 체적은 자연침강시와 비교하여 감소하며, 그 특성은 오니함량이 작을수록 현저함을 알 수 있다.

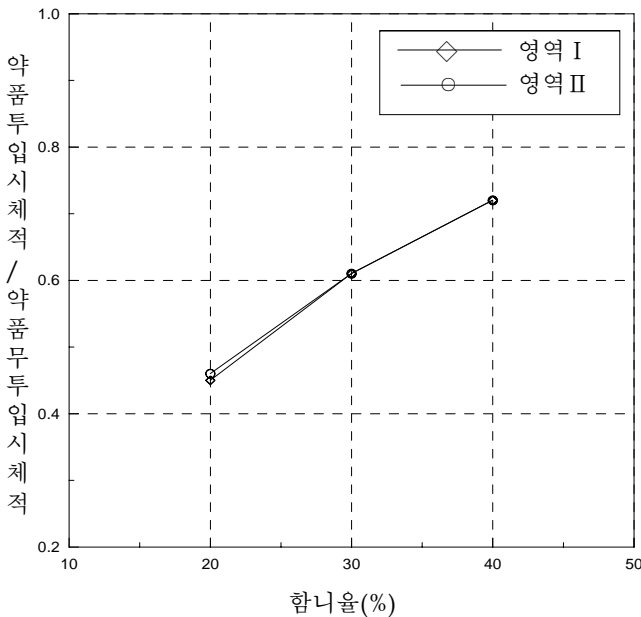


그림 8. 약품투입에 따른 준설오니의 체적변화

## 6. 결론

영랑호의 오니 준설토를 사용하여 오니 준설토의 체적변화에 대하여 실내 실험을 통하여 함니율 변화, 응집제 및 응결제 투입량의 변화에 따른 준설오니의 체적변화를 정량적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 준설오니에 침강 약품을 투입한 후, 오니의 침강축진 효과는 대부분 침강개시 후 약 30분 이내에 오니함량이 적을수록 현저히 발휘되며, 그 이후에는 약품을 투입하지 않은 상태의 자연 침강속도와 비슷한 경향을 보였다.
- (2) 침강개시로부터 3시간 후의 준설오니의 체적변화율은 약품을 투입하지 않았을 경우, 체적변화율은 오니함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 약품을 투입하였을 경우의 체적 변화율은 오니함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 자연상태 침강시 대비 약품투입 침강시에 따른 체적변화율 차이는 준설오니의 오니함량이 증가함에 따라 작아짐을 알 수 있었다. 따라서 약품투입에 의해서 준설 오니의 체적변화율은 자연상태 침강시와 비교하여 감소하며, 그 특성은 오니함량이 작을수록 현저히 나타났다.
- (4) 최대 침강 체류시간을 3시간으로 설정한 경우, 영랑호의 오니 준설토는 최적 배합의 침강약품을 투입한 경우에 오니 함니율 변화(20%~40%)에 대하여 자연상태 오니토의 체적은 준설후 1.69배 증가하였다.

(접수일자 : 2004년 5월 19일)

## 참 고 문 헌

1. 부산지방해양수산청(1999), 부산신항 준설토 투기장(2차) 실시설계용역 보고서.
2. 속초시청(1996), 영랑호 오염방지를 위한 실시설계용역 보고서, pp. 43~85.
3. 조홍연, 윤길립(2002), 응집제 및 응결제 주입에 의한 석호 준설물질의 체적변화. 한국해양해양공학회 논문집, 제 14권, 제 3호, pp. 192~200.
4. K. Hatano, J. Okada, H. Hanahuse, K. Taniguchi(1996), Bulking factor of dredged clay by Pump dredger. Proceedings of 31st Annual Meeting of Japanese Geotechnical Society, pp. 551~552.
5. K. Uchida, S. Suwa, T. Hamada(2002), Materials characteristics for reclaimed lands in Osaka Bay. Proceeding of Korea-Japan joint workshop, April, Busan, Korea, pp. 231~238.