

지오투브공법의 실용화방안에 관한 연구 Development of Geotube for Practical Use

신은철¹⁾, Eun Chul Shin, 오영인²⁾, Young In Oh, 이희재³⁾, Hee Jae Lee

¹⁾ 인천대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

²⁾ 인천대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Ph. D. Student, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

³⁾ 인천대학교 대학원 토목공학과 석사과정, M. S. Student, Dept. of Civil Eng., Univ. of Incheon

SYNOPSIS : Geotube is a tube made of permeable but soil-tight geotextile, hydraulically filled with soil include dredged sand and mud, which has been successfully applied in hydraulic and coastal engineering projects. This method is getting popular and used a lot in the advanced countries of the world because of economical, useful, and enable to store and isolate contaminated materials as obtained by harbor dredging. Laboratory and pilot scale in-situ tests were performed to determine the design methodology and construction procedures. From the results of laboratory and in-situ model tests, the retention ratio of solid particle is minimum 86% and minimum permeability and tensile strength of geotextile is $a \times 10^{-2}$ and 20 t/m, respectively. Also, based on the environmental model test results, it can be concluded that this method does meet the Korean EPA standards.

Key words : geotube, geotextile, retention ratio, minimum tensile strength, environmental dredging,

1. 서론

지오투브는 해안이나 하천, 항만분야에서 암석이나 콘크리트 등에 의한 강성구조물을 축조하는 대신 모래주머니와 같은 지오텍스타일 포대에 토사를 넣어, 호안제방이나 방파제를 축조하는 공법이다. 선진외국에서는 시공의 용이성, 경제성 특히, 환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 장점으로 광범위한 분야에서 사용량이 증가하고 있다. 지오투브는 파도나 폭풍으로 인한 해안이나 강변제방 보호 및 비상복구작업, 해안생태계를 보호하는 제방건설, 항구외곽의 방파제건설에 유용하게 활용할 수 있다. 따라서 국내 현실에 맞는 지오투브에 대한 연구가 시급히 진행되어야 하며, 국내실정에 적합한 지오투브의 설계와 시공방안을 제시하여야 한다. 일반적으로 지오투브는 지오텍스타일로 제조된 튜브로서 수리학적이나 기계적 방식에 의해 모래 또는 준설토로 채워 시공한다. 지오투브의 직경과 길이는 현장조건과 설치 가능성에 따라 차이가 있는데, 보통 길이는 150~180m, 폭 4~5m, 유효높이 1.5~2m정도이다. 지오투브의 상부에는 준설토를 수리학적 방법으로 채우기 위해 주입구와 배수구가 설치되어 있으며, 주입구의 설치간격은 지오투브내의 균등한 채움을 위해 모래질 흙의 경우에는 보다 가깝게 하고(10m 정도), 점토질 흙의 경우에는 가능한 멀게 한다.

2. 연구내용 및 범위

이 연구에서는 국내제품과 국내기술을 통한 지오투브공법을 실용화하기 위한 연구를 수행하였다. 선진외국의 시공사례와 미공병단에서 제시한 지오투브 최소시방기준을 바탕으로 국내에서 생산되고 있는 2개 업체의 지오텍스타일을 선정하였으며, 선정된 지오텍스타일에 대하여 내부 채움토사가 준

설토와 주문진 표준사 일 때에 대하여 대형전단시험, 유실율시험 등의 실내예비시험을 실시하였다. 대형직접전단시험기를 이용하여 지오텍스타일과 채움토사와의 접촉마찰특성을 분석하였으며, 파랑발생장치를 이용하여 실제 해안에 시공된 후 동적인 파랑에 대한 유실율을 측정하였다. 또한 환경준설매립에 따른 오염도 변화를 분석을 위하여, 지오투브에 오염토사를 내부채움재로 사용하였을 경우, 현장 자중압밀에 의한 투과수의 수질변화(COD, SS, TOC)를 측정하였으며, 해저설치시의 수질오염 영향을 분석하기 위하여 소형 모형투브를 제작하여 단기, 장기 모니터링(중금속함량, COD, SS)을 실시하였다. 상기의 연구결과를 바탕으로 실제 현장적용성 및 실용화 방안을 연구하기 위하여 시험시공 구간을 결정하고, 실제 실험 크기(길이 25m, 둘레 8m, 유효높이 1.5m)의 지오투브를 제작하여 시험시공을 실시하였다. 펌핑압력 및 속도, 슬러리의 비율을 변화시키며 실험을 실시하였으며, 계측 항목은 시간에 따른 지오투브내의 압력변화, 온도, 신율, 유효높이 단위중량의 변화를 측정하였다.

3. 시험방법

3.1 지오텍스타일

일반적으로 지오텍스타일의 종류는 직포, 부직포, 복합포 등 3종류로 구분 된다. 직포는 씨줄과 날줄을 엮어서 만든 섬유이며, 부직포는 장섬유 또는 단섬유 필라멘트를 니들펀칭하여 생산한다. 또한 복합포는 직포와 부직포를 접합하여 만들어진다. 지오투브에 사용되는 토목섬유는 직포와 복합포를 사용하는데 선진외국의 경우, 직포의 종류(Woven Monofilament, Woven Multifilament, Woven Silt Film)와 기능이 다양하여 채움토사가 미세하거나 오염물질인 경우를 제외하고는 직포를 단독으로 사용하는 경우가 많으며, 채움토사가 미세할 경우와 오염물질인 경우는 내부에 필터재(부직포)를 넣은 복합포를 사용한다. 국내에서 생산되는 지오텍스타일은 대기업 섬유업체에서 나오는 Yarn을 이용한 Woven Multifilament의 형태만으로 생산되고 있다. 미공병단에서는 CPAR(Corps' Construction Productivity Advancement Research)프로그램의 일환으로 지오투브에 사용되는 지오텍스타일 특성치에 대한 시방규정을 표 1과 같이 제시하였다. 각각의 현장조건 및 토사의 종류에 따라 지오텍스타일 선택에 차이가 있겠지만, 표 1은 최소한의 시방사항을 나타낸 것이다.

표 1. 지오텍스타일(직포)의 시방조건

물리적 성질	시험방법	단위	최소값
그래브 인장강도	ASTM D-4632, 4595	lb	1000
그래브 신률	ASTM D-4632, 4595	%	10
인열강도(Trapezoid법)	ASTM D-4533	lb	900~800
퀘틀립 강도	ASTM D-4833	lb	350
접합강도	ASTM D-4595	lb/in	600
유효구멍크기	ASTM D-4751	US Sieve	No. 100

이 연구에서는 국내에서 생산되는 Woven Multifilament 형태 지오텍스타일의 지오투브 적용성에 대하여 연구를 수행하기 위하여 국내생산 지오텍스타일 중 미공병단의 최소시방기준에 적합한 제품을 선정하였다. 표 2는 미공병단 최소시방기준을 만족하는 국내생산 지오텍스타일의 특성치를 나타낸 것이며, 그림 1은 생산업체에 따른 지오텍스타일의 형태를 사진으로 나타낸 것이다.

표 2. 국내 생산 지오텍스타일의 특성치 분석

물리적 성질	시험방법	단위	K사 제품		H사 제품	
			No. 1-1	No. 1-2	No. 2-1	No. 2-2
무게	ASTM D-5261	g/m ²	600	700	600	700
그래브 인장강도	ASTM D-4632, 4595	ton/m	20	25	20	25
그래브 신율	ASTM D-4632, 4595	%	10-50	10-50	10-30	10-30
투수계수	ASTM D-4491	cm/sec	10 ⁻² ~10 ⁻⁴	10 ⁻² ~10 ⁻⁴	10 ⁻² ~10 ⁻³	10 ⁻³ ~10 ⁻⁴

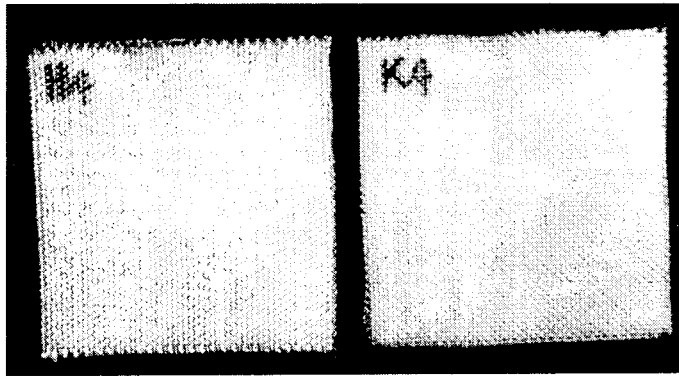


그림 1. 국내생산 지오텍스타일

3.2 지오투브 채움토사

이 연구에 사용된 지오투브 채움토사는 주문진 표준사, 준설토, 준설퇴니 세가지 채움토사를 사용하였다. 지오텍스타일과 채움토사와의 대형전단시험에는 주문진 표준사와 준설토를 사용하였으며, 유실을 측정하기 위한 모형시험은 송도신도시 준설패립현장의 준설토를 사용하였다. 또한 환경준설을 실시하였을 경우, 오염도변화 분석을 위하여, 인천 서구 생활하수 저류시설인 우수지의 준설퇴니를 사용하였다. 각각 채움토사의 기본물성시험 결과는 표 3과 표 4에 나타낸 바와 같으며, 각각의 채움토사의 입도분포곡선은 그림 2~그림 4에 나타낸 바와 같다.

표 3. 주문진 표준사 및 준설토의 공학적 특성

물성치	결과	
	주문진 표준사	준설토
유효입경(D ₁₀)	0.375(mm)	0.09(mm)
균등계수(C _u)	1.53	4.67
곡률계수(C _c)	1.10	1.06
최대간극비(e _{max})	0.91	-
최소간극비(e _{min})	0.53	-
비중(G _s)	2.65	2.66
USCS	SP	SP

표 4. 준설퇴니의 공학적 특성

시료 토질정수	결과
G _s	2.29
LL(%)	39.00
PL(%)	30.25
PI(%)	8.75
No. 200 passing(%)	60.94
유기물 함량(%)	15.33

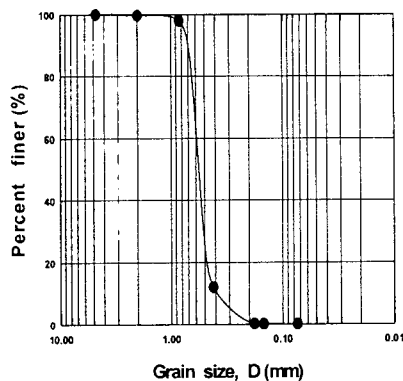


그림 2. 표준사의 입도분포곡선

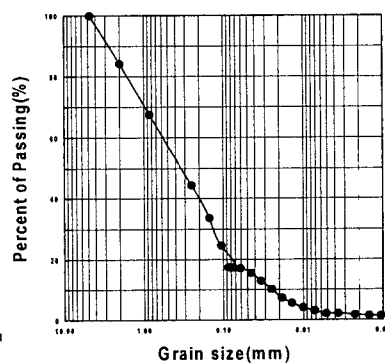


그림 3. 오니의 입도분포곡선

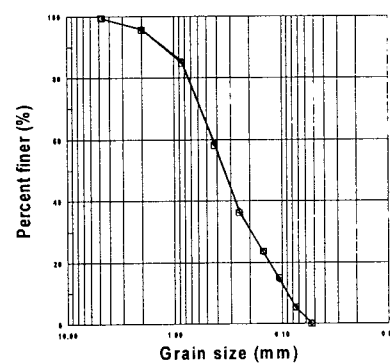


그림 4. 준설토의 입도분포곡선

3.3 실내모형실험

3.3.1 지오투브와 채움토사의 마찰특성시험

지오텍스타일과 채움토사와의 마찰특성을 분석하기 위하여 이 연구에서는 ASTM D 5321의 시험 방법에 의거하여 대형직접전단시험을 실시하였다. 대형직접전단시험기의 구성은 상·하부 상자의 크기가 각각 30cm×30cm, 높이가 9cm, 10cm이며 수직하중을 재하 할 수 있는 기압장치, 전단력을 측정할 수 있는 로드 셀, 수평변위측정 트랜듀서, 전단속도제어기로 구성되어 있다.

표 5. 마찰특성평가를 위한 시험방법

제품종류	인장강도	채움토사	
		준설토	표준사
K사	20 t/m	$\gamma_{d(max)}$ 의 90%	$D_r = 60\%$
	25 t/m		
H사	20 t/m	$\gamma_{d(max)}$ 의 90%	$D_r = 60\%$
	25 t/m		

3.3.2 지오투브의 유실율 측정시험

지오텍스타일은 토목섬유의 여러 기능 중, 필터 및 분리기능을 수행한다. 지오텍스타일 필터 설계 시 중요하게 사용되는 설계요소는 유효입경크기(EOS)이다. 따라서, 지오투브설계를 위하여 유효입경크기는 투수계수 및 유실율을 좌우하는 요소이다. 그러나, 국내에서 생산되는 지오텍스타일(직포)은 대부분이 대기업에서, 여러 중소판매업체로부터 주문을 받아, 소규모의 가내 연신공장에서 직조하여 판매하고 있는 형식으로, 사실상 제품의 균질성이 떨어지며 표준화되어 있지 못한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 직접 소형 지오투브를 제작하여, 교번하중을 가할 수 있는 실험장치에 설치하여, 실제현장조건과 유사하게 유실율을 측정하였다. 유실율 측정장치는 그림 5에 나타낸 바와 같으며, 실험조건은 내부채움토사로 준설토를 지오투브 부피의 80%로 채워 넣고, 유실율 실험장치에 설치한 후, 70rpm으로 약 10000Cycle의 교번하중을 주었다. 유실율의 측정은 1차적으로 유실율 실험 전·후의 무게를 측정하여 결정하였으며, 2차적으로 실험 전후의 입도분포시험을 실시하여 준설토 입경에 따른 유실율을 도출하였다.

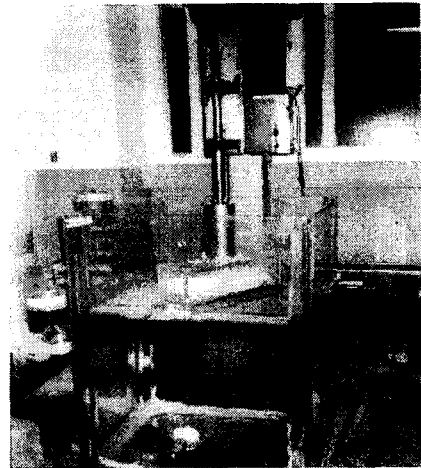


그림 5. 유실율 측정장치

3.3.3 환경실험을 통한 오염도 측정

지오투브의 내부 채움재로 해안 및 항만 오염토사를 채워, 환경준설매립을 할 경우, 환경적영향 및 오염도 변화를 측정하기 위하여 두 가지의 실험을 병행하여 실시하였다. 첫 번째는 지오투브 내부에 오염물질(생활하수 오니)을 넣고, 자중압밀에 의하여 투과되어 나오는 투과수에 대한 수질변화를 측정하며, 두 번째는 오염물질을 함유한 지오투브를 3차 증류수에 넣었을 경우, 증류수의 장기적인 오염도 변화를 측정한다.

첫 번째 실험은 단기적인 투과수의 오염도 변화 분석으로, K사와 H사의 지오텍스타일을 폭 1m, 길이 2m 크기의 지오투브로 제작한 후, 생활하수 오니를 약 3.5m³을 투입하였다. 오염도 측정항목은 초기 단위중량, 부유물질, COD, TOC값을 측정하였으며, 투과채취 시간은 즉시, 15분, 20분, 30

분, 1시간, 2시간, 3시간으로 약 1000ml씩 채취하였다. 두 번째 실험은 장기적인 오염도 변화 분석으로, 그림 6에서 보는 바와 같이, 둘레 25cm, 길이 50cm의 소형 지오투브를 제작하여, 오염물질(생활하수 오니)을 채운 뒤, 약 6개월간의 측정을 위하여, 14개 소형수조에 설치하였다. 증류수는 약 20ℓ의 3차 증류수를 사용하였으며, 측정항목은 장기간의 변화에 민감하지 않은 중금속함량과 부유물질, COD변화를 측정하였다.



그림 6. 오염도 분석용 소형 지오투브

3.4 Pilot scale 현장시험 시공

지오투브의 설계 및 시공에 영향을 미치는 주요인자는 크게 재료특성(강도, 투수성, 접합, 슬러리비율 등)과 시공의 기계적인자(펌프종류, 펌핑속도 펌핑압력 등) 및 환경적인자(해양환경에 대한 안정성, 수중오염도 변화)를 들 수 있다. 이 연구에서는 각종 실내 모형실험을 통하여 도출한 결과를 바탕으로 단일 종류의 제품을 선정하여, 현장시험시공을 실시하였으며, 시험시공 현장은 송도 공유수면 매립공사 제 1공구 준설현장에서 실시하였다. 시험시공 개요도는 그림 8에서 보는 바와 같다. 현장시험시공을 통하여, 지오투브 공법의 적용성을 검증하기 위하여, 슬러리비율, 펌프압력 및 속도 등의 변화를 주었으며, 측정항목은 내부 채움토사의 단위중량변화와 증방향·횡방향 신율을 측정하였다. 또한 그림 7에서 보는 바와 같이, 지오투브 하부에 4m 간격으로 토압계를 설치하여 배수상태와 자중압밀에 의한 하부토압변화를 측정하였다. 시공 시 사용한 펌프는 펌핑압력으로 인한 지오투브의 파열을 고려하여 결정하였다.

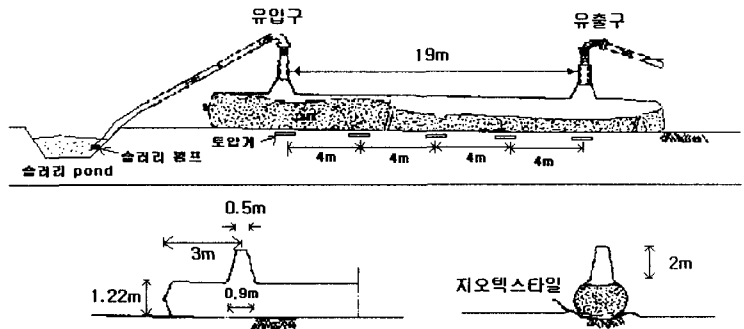


그림 7. 지오투브 시험시공 개요도

4. 실험결과 및 분석

4.1 마찰특성시험

지오투브 재료로 사용되는 지오텍스타일과 채움토사(주문진 표준사, 준설토)와의 접촉마찰특성을 분석하기 위하여 대형직접전단시험을 실시하였다. 표 6은 대형직접전단시험에 따른 접촉마찰각을 나타낸 것이며, 그림 8은 지오텍스타일 종류에 따른 준설토와의 시험결과를 나타낸 것이다.

표 6. 마찰특성평가를 위한 시험방법

제품종류	인장강도	접촉마찰각(deg)	
		준설토	표준사
K사	20 t/m	33.64	37.2
	25 t/m	34.75	38.8
H사	20 t/m	33.89	35.8
	25 t/m	36.62	36.9

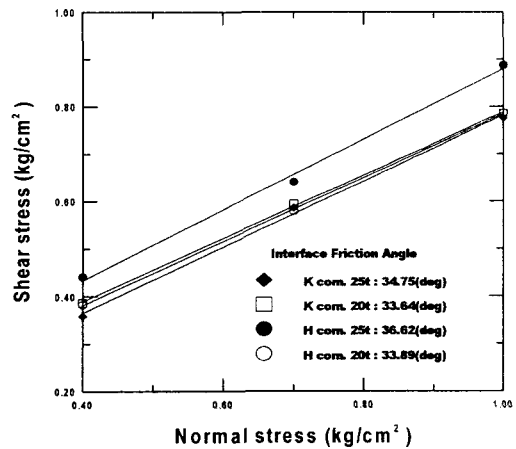


그림 8. 수직응력-전단응력곡선(준설토)

표 6와 그림 8에서 보는 바와 같이 지오텍스타일의 섬유 연신량이 많을수록 채움토사와의 접촉 마찰각이 크게 나타남을 알 수 있으나, 그 차이가 상당히 미소하여 제품 및 인장강도에 따른 접촉 마찰특성은 상대적으로 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 제품 생산의 경제성을 고려할 때, 낮은 인장강도의 제품을 사용하여도 큰 차이가 없을 것으로 판단된다.

4.2 유실율 시험

이 연구에서 유실율 시험은 지오투브를 해안 및 해저에 시공하였을 경우, 현장조건과 유사한 교번하중을 주고, 지오투브의 종류에 따른 채움토사의 유실량을 측정하였다. 또한, 실험 전·후에 입도분포시험을 실시하여 토사입자크기에 따른 유실율도 측정하였다. 표 7은 지오텍스타일 종류에 따른 유실율을 나타낸 것이며, 그림 9는 토사입경에 따른 유실율을 나타낸 것이다.

표 6. 지오텍스타일 종류에 따른 유실율

제품종류	인장강도	유실율(%)
		준설토
K사	20 t/m	5.05
	25 t/m	6.09
H사	20 t/m	4.17
	25 t/m	13.76

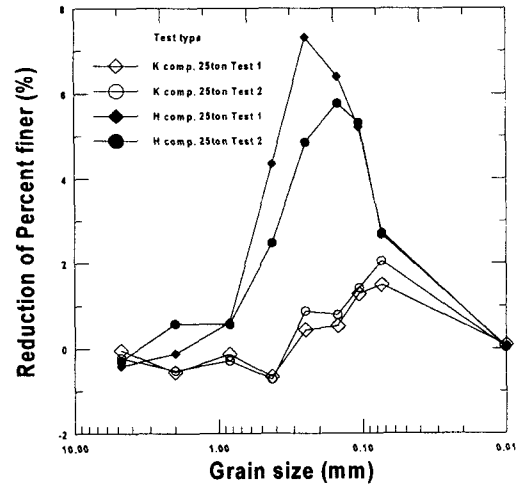


그림 9. 토사 입경에 따른 유실율

표 6에서 보는 바와 같이 인장강도가 큰 제품이 유실율이 크게 측정되었다. 즉 섬유 연신량이 많기 때문에 섬유사이의 공극이 크을 알 수 있다. 또한 그림 9에서 보는 바와 같이, 토사입자가 0.075mm~0.4mm사이의 입자의 유실율이 크게 나타남을 알 수 있다.

4.3 오염도 측정시험

환경 준설매립을 실시할 경우, 장·단기 오염도 변화를 측정하기 위하여, 자중압밀에 의한 단기 Filtration 시험과 지오투브 소형모형을 통한 장기 오염도변화를 도출하였다. 그림 10과 그림 11은 지오투브 투과수의 단기 SS와 COD변화를 나타낸 것이며, 그림 12는 장기적인 증류수의 오염도 변화를 나타낸 것이다.

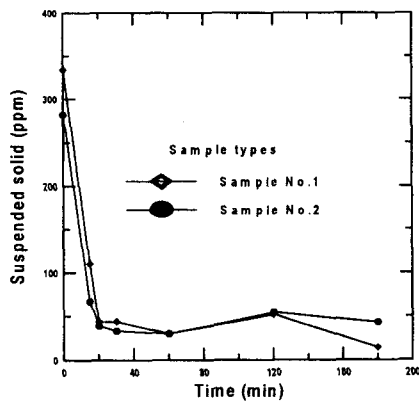


그림 10. 부유물질의 변화

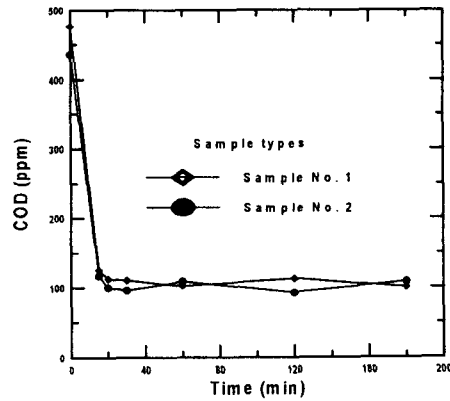


그림 11. COD값의 변화

단기 오염도 변화는 그림 10과 그림 11에서 보는 바와 같이, 오투입 30분 후 급격히 감소하여 30분 이후의 부유물질 및 COD값에 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 그러나 장기적인 증류수의 오염도 변화를 살펴보면, SS의 경우, 약 10일 이후부터 큰 변화량을 보이지 않으며, COD이 경우 약 8주 이후부터 완만한 증가현상을 보인다. 이러한 결과는 단기적으로 지오텍스타일의 섬유 사이에 클로킹현상이 발생하여 오염토사 입자의 유출입이 급격히 감소하지만, 장기적으로 오염토사 내부의 오염물질이 이동하여 COD값이 변화하는 것으로 판단된다. 상기의 시험결과에 따른 COD와 SS변화는 수질규제기준에 명시된 배출허용기준을 만족하여, 지오투브를 활용하여 환경준설매립을 실시할 경우, 오염도 확산 및 장기적 환경오염에 대하여 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

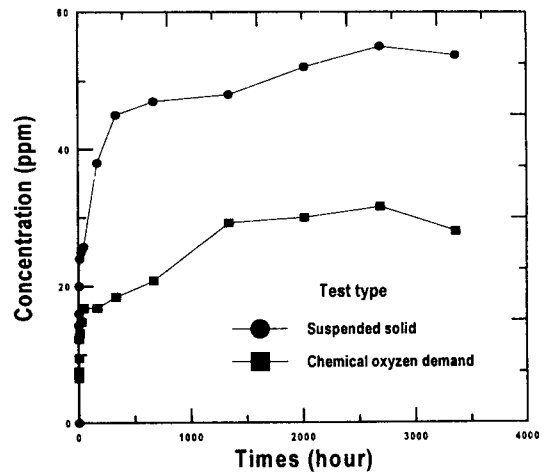


그림 12. 오염도 변화추정(장기)

4.4 현장시험

이 연구에서는 지오투브의 시공성 및 국내 현장 적용성을 검증하기 위하여, Pilot scale의 현장시험시공을 실시하였다. 시험시공에 사용한 지오텍스타일은 K사의 제품으로 실내실험 결과와 경제성을 고려하여 인장강도 20 t/m의 제품을 사용하였으며, 지오투브의 중요한 설계인자인 펌핑속도, 펌핑압력, 슬러리 비율 등을 변화시켜가며 시험을 실시하였다. 그림 13은 지오투브 하부에 매설한 토압계의 계측값을 나타낸 것이다. 그림 15에서 보는 바와 같이, 펌핑 종료 시점까지 약 1시간 40분동안 튜브내의 하중은 계속 증가하였으며, 시공완료 직후부터 배수와 압밀이 진행되어, 약 24시간까지 배수와 함께 급격한 압밀이 진행되었으며, 24시간 이후부터 완만한 감소를 보였다. 또한 유효높이의 변화 및 단위중량의 변화도 유사한 경향을 나타내었다. 현장시험시공결과, 슬러리 비율을 6:4(물:토사)이상이 되어야 할 것으로 판단되며, 지오투브의 유효높이의 80%이상 충전되었을 경우, 지오텍스타일의 봉합부위가 파손되어 펌핑압을 견디지 못함을 알 수 있었다

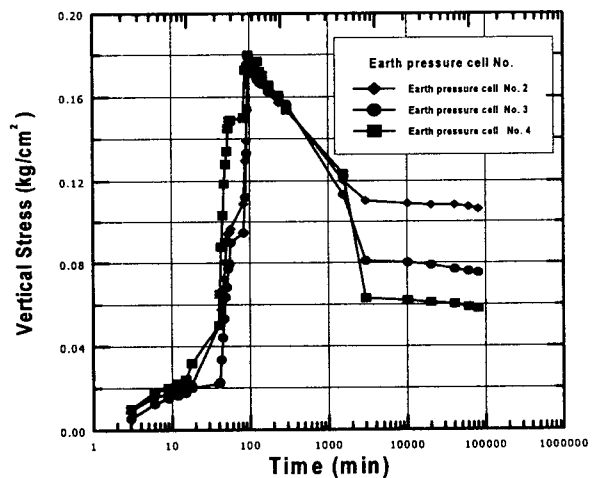


그림 13. 토압계의 계측결과

5. 결론

지오텍스타일을 활용한 지오투브공법의 실용화를 위한 상기의 시험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 유효입경(EOS)의 정확한 측정이 어려운 국내 지오텍스타일 생산 현황을 고려할 때, 지오투브의

국내 적용 시, 지오텍스타일의 투수계수는 $\alpha \times 10^{-4}$ 이상, 유실율이 10% 미만인 제품을 사용하여야 할 것으로 판단된다.

2. 장·단기 오염도 변화시험결과, 오염토사의 투입 후 30분 이후부터 지오텍스타일의 클로킹 현상으로 인하여, 부유물질의 유출입은 급격히 감소하였으나, 물의 이동을 통한 COD변화는 2개월까지 급격한 변화를 보였다. 지오텍튜브를 활용하여 환경준설을 실시할 경우, 오염도 변화는 장시간 지속되지만, 환경부 배출허용기준을 모두 만족하여 환경적인 영향이 거의 없을 것으로 판단된다.
3. 세립분을 많이 함유하고 있는 준설토에 대한 현장시험시공 결과, 슬러리 비율을 6:4(물:토사) 이상이 되어야 할 것으로 판단되며, 지오텍튜브의 유효높이의 80% 이상 충전되었을 경우, 지오텍스타일의 붕합부위가 파손되어 펌핑압을 견디지 못함을 알 수 있었다.

향후 상기의 연구결과를 바탕으로, 사질토와 실제오염토사를 준설하여 시험시공을 실시하며, 지오텍튜브의 설계 및 시공매개변수(응력분포, 인장강도, 접합강도 등)를 활용하여 수치모델링을 통한 지오텍튜브안정해석을 실시한다.

감사의 글

이 논문은 1999년 인천대학교 중소기업지원센터 제 7차 컨소시엄 “지오텍튜브를 활용한 해안 및 항만구조물”개발의 일환으로 연구되었으며, 당 센터의 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 현장시험 시공에 많은 도움을 주신 인천광역시 도시개발본부와 송도매립지 1공구 현대산업개발(주) 차수길소장과 (주)대우 엄대현차장에게 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) Koerner, R.M. and Welsh, J.P. (1980), *Construction and Geotechnical Engineering Using Synthetic Fabrics*, J. Wiley & Sons, pp. 160~229.
- (2) Charlton, F.G. (1984), *Geotextiles for bank protection in relation to causes of erosion, Flexible Armoured Revetments*, Thomas Telford Ltd., London, pp. 165~177.
- (3) Pilarczyk, K.W. (1997), “Application and Design Aspects of Geocontainers”, *Geosynthetics '97*, pp 147~160.
- (4) Hausemann, M.T. (1990), *Engineering Principles of Ground Modification*, McGraw-Hill, pp. 573~578.
- (5) Botzan, D., Kellner, L., and Moisa, C. (1982), “Construction elements for river bank defense structures using woven geotextiles”, *Proceedings of the Second International Conference of Geotextiles*, Las Vegas, pp. 223~227.
- (6) Fowler, J., Sprague, C.J., and Toups, D. (1994), Dredged material-filled geotextile containers, *U.S. Army Corps of Engineer, Environmental Effects of Dredging Technical Note*, EEDP-05-01.