

## Ultrasonically Enhanced Stabilization of Soft Clay

1) Kim, Young-Uk

2) Kim, Byoung-II

3) Song, Young-Karb

1) , (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Myongji Univ., [yukim@mju.ac.kr](mailto:yukim@mju.ac.kr))

2) , (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Myongji Univ.)

3) , (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Myongji Univ.)

**ABSTRACT** : Various researches have been undertaken to develop a method of enhancing consolidation. This study investigated the effect of ultrasound on consolidation through a series of laboratory experiments. The tests were conducted using a specially designed and fabricated equipments which can apply ultrasonic energy on a soil sample at consolidation test. Specimens were prepared using a centrifuge facility, and test conditions included ultrasonic power and treatment time. The results of the study show that the effect of ultrasonic energy on consolidation is significant. The degree of significance varies with the test conditions. It could be concluded that the study showed potential application of ultrasound to enhance consolidation.

: 준설패립 및 연약지반 처리에 있어 압밀축진 공법들에 대한 연구가 활발하다. 본 연구에서는 초음파를 사용하여 압밀축진을 유발하고자 하였고 그 영향 정도를 실내실험을 통하여 조사하였다. 실내실험은 특별히 제작된 압밀시험기를 사용하였으며 압밀시험 중 초음파를 시료에 직접 가할 수 있도록 고안되었다. 압밀시험 재료로는 원심력 시험기를 사용하여 원하는 조건에 맞는 동질의 시료를 제작하여 사용하였으며 초음파 강도, 처리 시간을 달리하여 시험을 실시하였다. 시험결과 초음파가 압밀에 미치는 영향은 큰 것으로 나타났으며 초음파 처리의 영향에 미치는 정도가 시험조건에 따라 다르게 나타났다. 본 연구의 결과를 이용하여 초음파에 의해 압밀축진을 위한 공법개발의 가능성을 파악하였다.

**Keyword** : 압밀, 전해질, 점토, 초음파, 투과성, 필터재

### 1. 서 론

급속한 산업화 및 경제 발전으로 팽창하는 산업시설을 위한 국토면적 확보가 절실하다. 현재 우리나라 서해안 및 남해안에서는 준설패립을 통하여 사용 가능한 국토를 확장하고 있으나 지반이 매우 연약하여

매립된 지역의 공학적 처리가 시급하다. 매립을 통하여 확보된 지역이 충분한 극한지지력을 가지고 있지 않는 연약지반이거나 준설 매립된 지역에서는 지반개량이 필수적인데 그 중 압밀촉진법, 즉 입자사이에 간혀있는 물을 외부 또는 내부적으로 힘을 가하여 빼내어서 더 단단한 지반으로 개량되는 현상을 이용한 지반개량법이 그중 가장 대표적이며 가장 간단한 방법 중의 하나이다. 그러나 공법의 적용에 있어서 오랜 시간을 요하는 결정적인 단점을 안고 있어서 소요시간을 단축시키는 방법에 대한 연구가 활발하다. 또한 대부분의 연약지반 처리공법은 고가의 공사비를 요구하고 있어 이러한 단점들을 보완하기 위하여 여러 가지 공법들이 제시되어왔지만 현장의 조건에 따라 적용가능성이 달라지며 보다 광범위하게 적용할 수 있는 압밀촉진법에 대한 광범위한 연구가 요구되어지고 있는 실정이다.

압밀촉진공법으로 개발되지는 않았으나 토양오염물질을 제거하기 위하여 근래에 제안된 최신공법 중 초음파를 이용하여 토양의 수분 및 오염물의 이동을 촉진시키는 방법이 개발되었다(Kim et al., 2000). 초음파의 적용범위는 매우 광범위한데 우선 화학분야에서는 화학물질의 화학적 결합을 끊기 위하여 사용되거나 세척에 사용되기도 하며 금속표면에 흠을 찾기 위하여서도 사용되어지고 있다. 또한 생물학 분야에서는 매우 강한 초음파를 이용하여 세포를 파괴하는데 사용되기도 하고 효소세척에도 사용되고 있다(Frederick, 1965). 이상과 같이 여러 분야에서 초음파가 다각도로 사용되어지고 있는데 특히 최근에는 오염물질의 제거 분야에서도 활발히 사용되어지고 있다. 몇몇 연구자(Cleveland and Garge, 1993, Iovenitti, 1995, Reddi and Challa, 1994)는 토양오염 정화 및 복원법에 초음파의 적용성에 관하여 연구하였는데 초음파를 토양에 투사하여 토양 매체 내에 압력수두를 유발시키며 유체 저항성을 감소시켜 간극수 및 오염물의 이동이 촉진되는 것을 보였다.

일반적으로 다공매체에 초음파를 가하면 감쇄(attenuation)현상이 발생하는데 이는 초음파에 의해 발생된 파동운동이 간극수와 입자간의 마찰을 일으켜서 이로 인한 에너지 흡수에 기인한다. 이러한 이유로 인하여 초음파를 다공매체에 가하게 되면 임의의 두 지점간의 압력차 즉 압력저하를 유발하게 되어 하중 재하와 같은 효과를 낳아서 간극수의 이동을 유발시킨다. 또한 sonication은 토양입자의 구성을 재배열하고 또 토양입자에 흡착된 흡착수를 탈착시키는 작용을 하여 공극수의 이동을 촉진시킨다. 다공매체에서의 에너지 감쇄현상은 다음 식과 같이 대략적으로 나타낼 수 있다.

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

즉 초음파에서 발생하는 초기의 초음파 강도( $I_0$ )는 거리( $x$ )에 따라 급하게 감소함을 알 수 있다. 또한 Darcy의 법칙에서 다공매체의 공극수의 유량( $Q$ )은 간극수의 점도(viscosity,  $\eta$ )에 반비례하는 것으로 알려져 있고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q \propto \frac{1}{\eta} \quad (2)$$

그리고 점도는 초음파의 주파수와 다음과 같은 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

$$\eta w^a = a \quad (3)$$

위의 식에서  $w$  는 주파수를 나타내고 있고  $a$ 와  $a$ 는 각각 임의의 상수를 표시하고 있다. 식 (2)와 (3)을 동시에 고려하여 보면 초음파에 의해 감소된 점도로 인하여 유량이 증가하는 것을 알 수가 있다. 위와 같은 초음파에너지가 연약지반에 미치는 복합적인 영향으로 인하여 압밀이 촉진되어 단시간 내에 목적하는

압밀도를 얻을 수 있게 되어 시공성 향상 및 공기 단축 의한 공사비 절감을 기대할 수 있다.

## 2. 실내시험

### 2.1 시험에 사용된 재료

본 연구에서 사용된 시료는 부산 해안지역에서 채취한 해성점토를 사용하였으며 점토를 #100 체에 통과시킨 후 사용하였다. 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 표 1과 같으며, 입도분포는 그림 1과 같다.

표 1. 시험에 사용된 재료의 특성치

특성치	Specific gravity, $G_s$	Atterberg limit		USCS
		LL(%)	PI(%)	
점토	2.72	63.8	35	CH

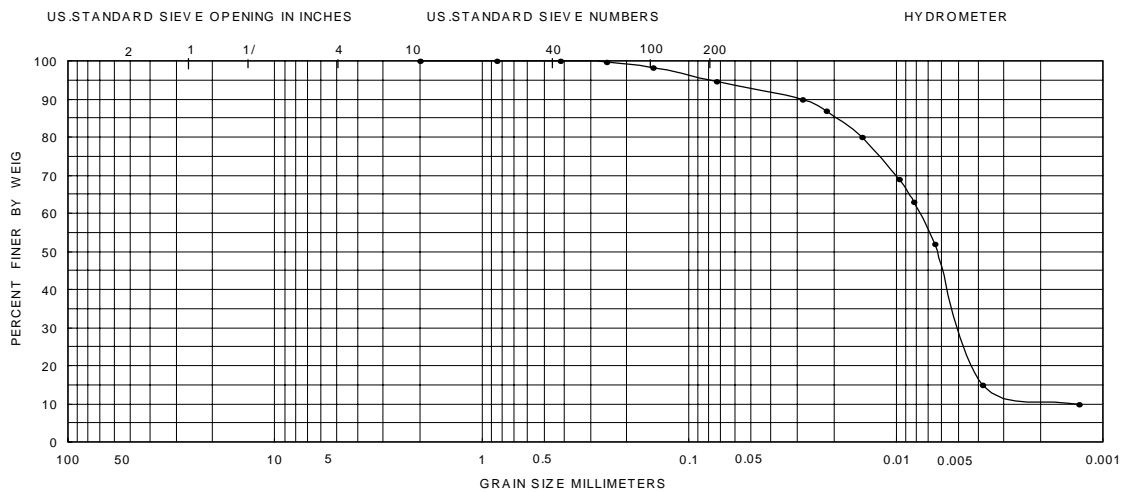


그림 1. 시험에 사용된 시료의 입도분포곡선

### 2.2 원심력 압밀 시험기 및 압밀상자

이번 연구의 모든 시료의 성형 및 초기조건 수립을 위한 초기압밀에는 원심력 압밀 시험기를 사용하였다. 명지대학교 지반공학연구실에서 개발한 원심력 압밀 시험기(Park et al., 2003)는 그림 2와 같으며 길이 50cm의 회전팔(arm) 8개가 대칭으로 부착되어 있고, 7.5HP의 모터 용량으로 최대 1140rpm의 회전이 가능하다. 또한 시험 목적에 적합하도록 지름 20cm(길이 40cm)의 원통형 압밀용기를 제작하였다. 이 원통형 압밀용기에 슬러리 상태의 시료를 넣어 소정의 회전 원심력으로 회전시키면 비교적 균질한 상태의 점토공시체를 얻을 수 있다. 회전에 앞서 원통형 압밀상자에서 배수가 잘 되도록 배수재를 설치하였으

며, 배수재와 시료의 마찰을 최소화하기 위하여 배수재와 시료 사이에 다공 필름을 설치하였다.

초음파를 이용한 압밀시험 수행을 위한 실내시험은 특별히 제작된 압밀시험기를 사용하였다. 시료의 수평변위가 발생되지 못하도록 압밀링으로 이루어 졌으며 시료의 상부에는 다공질판(porous stone)을 설치하고 하부에는 필터재를 설치하여 배수를 가능케 하고 압밀시험 중 초음파를 시료에 직접 가할 수 있도록 고안되었다. 초음파 발생장치의 모식도가 그림 3에 나타나 있다.

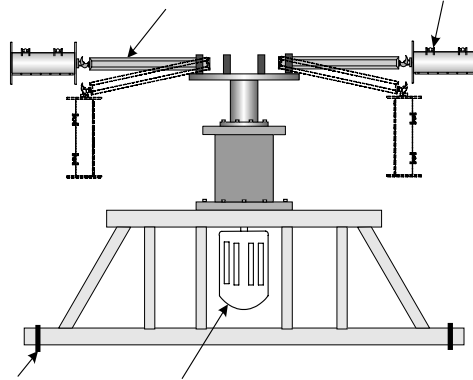


그림 2. 원심력 압밀 시험기

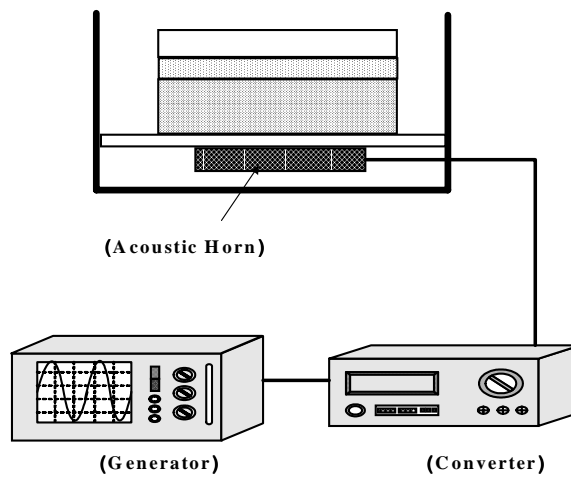


그림 3. 초음파 발생기구(Ultrasonic processor) 및 압밀시험기

### 2.3 시험방법

이 번 연구에서 실시한 실험 방법을 정리하면 우선 실내시험에서 적정한 점토 시료를 얻기 위하여 원

심력 압밀시험기를 이용하여 점토 시료를 압밀하였다. 단계별로 회전 원심력을 가하여 시료를 압밀하였으며 한번에 최대 8개의 균일한 시료를 얻을 수 있었다. 또한 초기 압밀된 시료에 대하여 초음파를 가하지 않는 경우와 초음파를 가한 압밀실험을 동시에 수행하였다.

시험순서를 다시 정리하면 다음과 같다.

- ① #100 체를 통과한 점토시료에 대해 물을 붓고 덩어리가 없는 슬러리 상태로 만든다.
- ② 시료를 끓여 시료속의 기포를 제거하고 원심력 압밀용기에 넣는다.
- ③ 조성된 점토지반에 상재압을 주기 위해 3.6kg의 추를 올려놓고 원심력 압밀 시험기에서 50rpm씩 증가시키면서 최대 150rpm의 회전 원심력으로 예압밀한다(사진 1).
- ④ 예압밀이 완료되면 시료가 자립할 수 있도록, 200rpm(압밀압력 83.5kPa)과 250rpm(압밀압력 99kPa) 300rpm(압밀압력 130kPa)의 회전원심력으로 약 36시간 동안 압밀한다(표 2).
- ⑤ 압밀이 완료되면 압밀용기에서 시료를 꺼내 성형한 뒤 초음파의 조사조건을 달리하며 압밀시험을 실시한다(사진 2).

표 2. 회전 원심력과 압밀압력의 관계 (지름 10cm 압밀용기 사용시)

rpm (회전 원심력)	r (압밀 용기 중양까지의 거리, cm)	시료무게 (W, Kgf)	F(Kgf)	$p'$	$p'_c$
				(kPa) Calculated	(kPa) Measured
50	75	1.5	3.14	4	-
100	75	1.5	12.60	15	-
150	75	1.5	28.32	36	-
200	75	1.5	50.35	76	83.5
250	75	1.5	78.68	100	99
300	75	1.5	113.30	144	130



사진 1. 점토시료 압밀



사진 2. 압밀시험

### 3. 시험결과 및 분석

초음파 처리가 압밀축진에 미치는 정도를 파악하였으며 특수 제작한 압밀시험기를 통해 압밀시험을 실시하였다. 일반적인 압밀시험과 초음파 처리를 동반한 압밀시험을 비교, 분석하였다.

그림 4와 그림 5는 함수비가 동일한 점토시료에 대해 초음파 강도 25kHz로 각 하중 단계에서 50W의 강도로 1시간 조사한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 하중을 단계적으로 재하 시킨  $e - \log p$  압밀곡선과 시간-침하량 관계곡선을 비교한 것이다. 그림에서 보이듯이 같은 하중에서 초음파를 가한 경우가 가하지 않은 경우보다 침하가 많이 발생한 것을 알 수 있으며 높은 압축성을 보인다. 즉 같은 침하량을 얻기 위한 시간이 매우 단축됨을 알 수 있다.

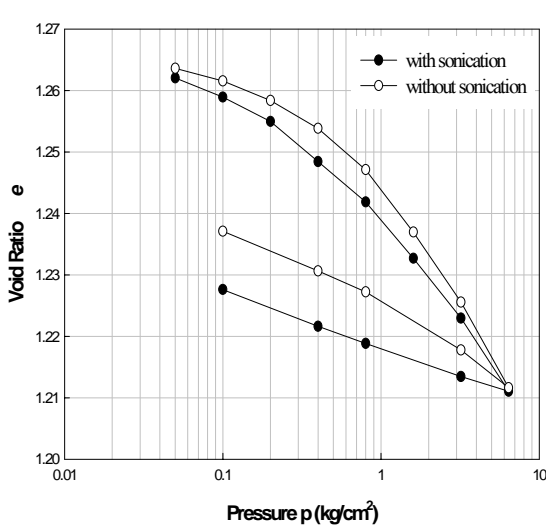


그림 4. 압밀시험결과와의  $e - \log p$

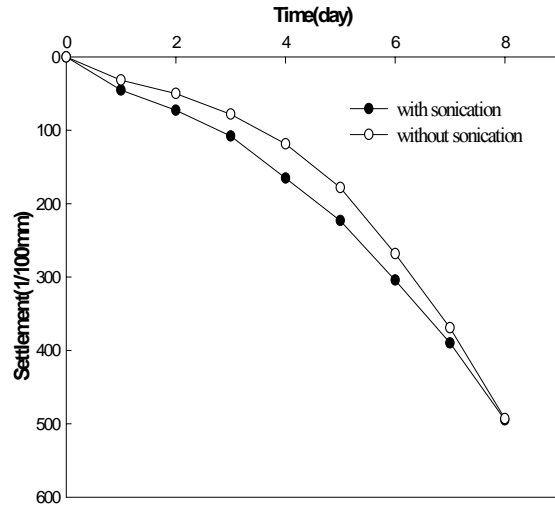


그림 5. 시간-침하량 곡선

그림 6은 압밀하중과 체적압축계수( $m_v$ )와의 관계를 나타낸 것으로 선행압밀하중 이전과 과압밀영역에서는 체적압축계수는 많은 차이를 나타내고, 선행압밀하중 후 정규압밀영역에서는 직선적으로 감소되어 한 직선으로 수렴하는 양상을 나타낸다. 초음파 조사시간에 따른 점토시료의 간극비 감소율을 알아보기 위하여 초음파를 조사하지 않은 압밀시험에서 구한 초기간극비를  $e_0$ 라고 하고 이에 대하여 초음파 적용시료에 대한 간극비를  $e$ 라 할 때 초음파 적용시간 증가에 따라  $e/e_0$ 로 정규화 시키면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 점토시료의 하중증가에 따른 간극비 감소율이 초음파의 조사시간에 의해 감소된다는 것을 알 수 있다. 이는 초음파 조사시간 증가에 따라 압밀효율이 증가함을 나타낸다고 판단된다. 또한 초음파 조사 시간을 늘려가면서 실험을 하면 적정 조사시간을 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

공학적인 관점에서 압밀문제는 압밀침하량이 얼마나 긴 시간에 걸쳐 일어나느냐 하는 문제로 귀착된다. 점토지반에 있는 물이 모래, 지반 등의 배수층으로 빠져 나가야만 침하가 일어나므로 일반적으로 침하는 아주 천천히 일어나게 된다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 초음파로 처리한 시료는 초음파 에너지로 인한 감소된 점도 및 압력수두차로 인하여 공극수의 이동을 촉진시켜 압밀에 걸리는 시간이 크게 단축된다는 것을 알 수 있었으며 초음파의 적용성과 효율성을 검증할 수 있었다.

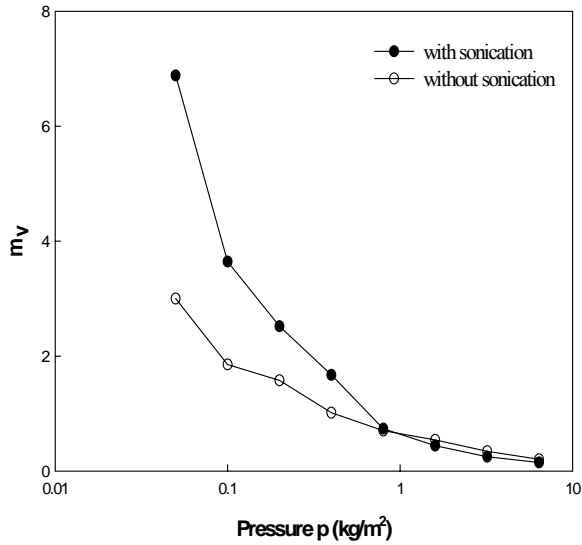


그림 6. 체적압축계수와 압밀하중

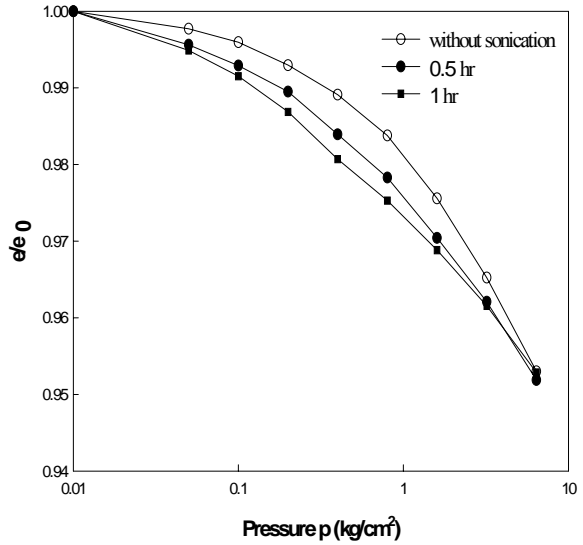


그림 7. 초음파 적용시간에 따른 간극비 감소율

#### 4. 결 론

이번 연구에서는 초음파를 사용하여 압밀축진을 유발하고자 하였고 그 영향 정도를 실내실험을 통하여 조사하였다. 특별히 제작된 압밀시험기를 사용하였으며 압밀시험 중 초음파를 시료에 직접 가할 수 있도록 고안되었다. 압밀시험 재료로는 원심력 시험기를 사용하여 원하는 조건에 맞는 동질의 시료를 제작하여 사용하였으며 초음파강도, 처리 시간을 달리하여 시험을 실시하였다. 초음파 처리에 따른 영향이 시험 조건에 따라 다르게 나타났으며 실내시험결과를 토대로 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

- ① 초음파 에너지로 인하여 압밀에 걸리는 시간이 크게 단축된다는 것을 알 수 있었다.
- ② 과압밀 영역에서의 압밀은 초음파에 의한 적용성이 큰 것을 알 수 있었다.
- ③ 간극비 감소율로서 시료종류에 따른 초음파의 적정 조사량을 판단할 수 있음을 알 수 있었다.
- ④ 적용범위가 제한되지 않는 광범위한 새로운 기술 개발의 가능성을 파악하였다.

#### 감사의 글

이 연구는 한국학술진흥재단에서 주관하는 신진교수연구과제지원사업 (과제번호: KRF - 2003 - 003 - D00464)의 일환으로 실시되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고문헌

1. Cleveland, T, G and Garg, Sanjay, (1993), *Field demonstration of enhanced soil washing system*

- for in-situ treatment of low-permeability soils*, Waste Management Proceedings of the Gulf Coast Hazardous Substance Research Centers Symposium on Emerging Technologies: Metals, Oxidation, and Separation, Vol. 13, No 5-7, pp. 519-520, Belmont, TX.
2. Frederick, J. R, (1965), *Ultrasonic Engineering*, New York: John Wiley and Sons.
  3. Iovenitti, J. L., Rynne, T. M., and Spencer, J. W., Jr., (1995), *Acoustically enhanced remediation of contaminated soil and ground water*, Proceeding of opportunity 95-environmental technology through small business, Morgantown, West Virginia, November.
  4. Kim, Y., Khim, J., and Lee, I. (2000), *Sonication Effect on NAPL Extraction from soils*, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 16, No.2, pp. 25-28.
  5. Park, Yong -Won, Kim, Byoung -Il, Lee, Sang -Ik, and Park, Jong -Ho, (2003), *Triaxial Test on Sand -Clay Composite Samples*, Proceedings of the 12 ARC Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 1, pp. 521 -524, Singapore.
  6. Reddi L.N. and Challa, S., (1994), *Vibratory mobilization of immiscible liquid ganglia in sands*, Journal of Environmental Engineering, Vol. 120, No. 5, pp. 1170-1190.