

## 초음파를 이용한 카올린 점토의 계수 및 감쇠 특성

### Modulus and Damping Properties of Kaolinite Using Ultrasonic Testing

민 덕 기\* Min, Tuk-Ki

#### Abstract

The objective of the present research is to evaluate the wave propagation velocity and attenuation characteristics of kaolin clay specimens using ultrasonic testing. Test specimens with known initial micro-fabric were prepared using a two-stage slurry consolidation technique. For a known state of stress conditions, initial void ratio, and micro-fabric, a series of experiments were conducted to evaluate the longitudinal wave propagation velocity and associated damping behavior. The effects of major variables involved in ultrasonic testing of cohesive soil were considered in this study. Ultrasonic velocity was not correlated to the microfabric structure under the given consolidated pressure whereas ultrasonic attenuation was affected by the microstructural properties of the specimen.

#### 요 지

본 연구에서는 초음파실험을 통하여 카올린 점토 시료의 초음파 전파 속도와 감쇠특성을 조사하였다. 슬러리 압밀 방법을 이용하여 이산구조와 면모구조를 갖는 두 종류의 카올린 점토를 인공적으로 제작하였다. 초음파를 이용하여 각 구조를 가진 점토의 압축파 속도 및 감쇠 거동을 측정하였다. 측정시 가진 주파수, 시료 길이, 측정 방향 등을 변화시키며 그에 대한 영향을 조사하였다. 실험 결과 전파속도는 같은 압축 응력 조건에서 제작된 본 시료의 경우 미세구조의 영향이 크지 않았으나 감쇠 특성은 미세구조의 영향이 큰 것으로 나타났다.

**Keywords :** Damping, Kaolinite, Microfabric, Slurry consolidated method, Ultrasonic

#### 1. 서 론

초음파시험은 비파괴 시험의 일종으로 재료의 구조를 조사하는 데 사용된다. 초음파는 20kHz 이상의 고주파로 매질을 전파하는 응력파이다.

초음파가 재료 속을 통과할 때의 속도는 통과 매질의 물성과 경계 조건에 영향을 받는다. 파가 매질을 통과할 때의 성분은 일반적으로 속도성분과 감쇠성분으로 나타낼 수 있다.

Sheeran 등(1967)은 3종류의 다짐된 흙에 대한 초음파시험을 통하여 P파의 속도를 측정하여 최대 P파 속도와 최대 건조밀도는 최적함수비의  $\pm 0.5\%$ 내에서 일치함을 보였고, 또한 함수비가 최적함수비 이상으로 증

가하면 도리어 전파속도는 감소한다고 하는 연구 결과를 발표하였다. Sheeran 등의 연구 이후 장비나 자료 수집 및 분석 기법에 큰 발전이 있었다. 구체적인 예로서 Stephenson(1978)은 실트질 흙에 대하여 초음파의 P파 및 S파를 측정하여 이로부터 동탄성계수 및 동전단탄성계수를 구하였다. 시료 크기가 큰 시료가 작은 시료보다 더 선명한 신호를 볼 수 있었으며, 최적의 신호지속시간(pulse duration), 신호주기(interval) 및 주파수는 흙의 종류에 따라 다르다고 하였다. P파 속도는 간극비가 증가함에 따라 감소하였으나 S파의 속도는 큰 변화를 보이지 않았으며, 같은 간극비 상태에서는 포화도가 증가함에 따라 두 파의 전파 속도는 증가하였다. Wang 등(1991)은 정적 하중 하에서 다짐 실트

\* 정회원, 울산대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Geo-Environmental System Engrg., Univ. of Ulsan, tkmin@mail.ulsan.ac.kr)

롬에 대하여 함수비와 압력에 따른 초음파 속도의 변화에 대한 연구를 수행하였다. 흙에서의 초음파의 속도는 다짐 에너지가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 함수비가 감소하면 속도는 증가하는 것으로 나타났는데 낮은 함수비에서 속도가 증가한다는 것은 낮은 함수비에서 흙의 체적변형계수가 크다는 것을 나타낸다. Sologyan(1990)은 현장에서의 흙의 밀도 측정을 위한 초음파의 응용에 대하여 연구하였다. 초음파가 흙의 밀도, 함수비, 미세구조를 추정하는데 효과적이라고 제안하였다. Nazli Yesiller 등(2000)은 3종류의 흙에 대하여 다짐의 효과를 초음파를 이용하여 조사하였다. 연구 결과 함수비에 따른 P파의 속도의 변화는 함수비에 따른 밀도의 변화와 유사하게 나타났다. 속도는 다짐효과의 증가에 따라 그리고 소성이 감소함에 따라 증가하였다. 속도는 흙 입자의 양이 증가함에 따라, 물과 공기의 양이 감소함에 따라 큰 값을 나타내었다. 초음파 탐지기의 배열에 대한 영향으로 surface transmission 배열을 한 현장에 적용하여 본 결과 through transmission 배열을 한 시험실의 결과와 20% 내에서 일치하여 현장 적용 가능성을 입증하였다.

본 연구에서는 동적거동에 대한 점토 구조의 영향을 고려하기 위하여 카올린 점토의 면모구조 및 이산구조의 시료를 인공적으로 제작하여 초음파실험을 실시하였다. 지반의 동적특성 중 가장 중요한 계수인 동탄성계수와 감쇠특성에 영향을 미칠 수 있는 요소들인 가진주파수, 파동의 전파방향, 시료의 형상 등의 변화에 따른 영향을 조사하였다. 지금까지의 대부분의 연구에서는 주로 동탄성계수의 측정에 초점이 맞추어져 있었으나 본 연구에서는 동탄성계수뿐 아니라 박편시료를 이용하여 감쇠특성을 정량적으로 측정할 수 있었다.

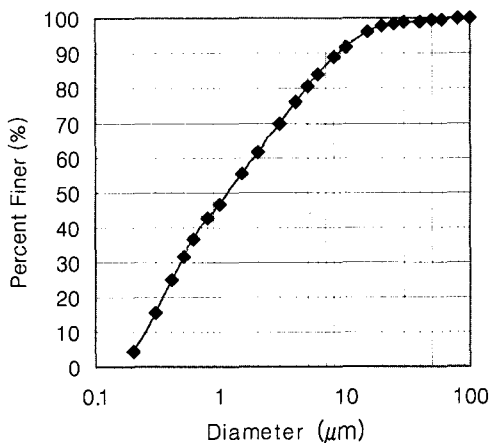


그림 1. 입도분포곡선

## 2. 시료 제작 및 측정 장비

### 2.1 시료 제작

본 논문에서는 초음파시험을 하기 위하여 카올린 점토로 면모구조와 이산구조의 두 가지의 시료를 제작하였다. 사용된 카올린은 미국산 Georgia kaolin clay로 액성한계가 58%, 소성한계가 31%, 비중은 2.64이다. 사용된 점토의 입도분포곡선은 그림 1과 같다.

점토의 미세 구조를 인공적으로 제작하는 방법에 대한 연구는 많은 연구가들에 의해 시도된 바 있다. Martin (1965)은 카올린을 190% 함수비로 슬러리를 만들어 98.1KPa로 등방 압밀하여 면모구조의 시료를 만들고, 19.3MPa의 K<sub>0</sub> 상태로 압밀하여 이산구조시료(dispersed sample)를 만든 바 있다. 그리고 구조의 확인을 위하여 시료에 Carbowax를 주입하고 연마한 후 XRD로 시료 표면을 관찰하였다. Side와 Barden(1970)은 이산구조에는 수산화나트륨을 그리고 면모구조에는 수산화칼슘을 이용하여 시료를 제작하였으며, 미세구조를 SEM으로 확인하였다. O'Brien(1971)은 카올린과 일라이트에 대해 증류수와 소금물을 이용하여 면모구조의 시료를 제작하였다. Barden과 Sides(1971)는 점성토 시료의 구조를 관찰하기 위해 SEM뿐 아니라 TEM, 분광현미경 및 XRD기법들을 사용하기도 하였다. Hazen 등(1999)은 카올린에 탈기, 탈이온 증류수를 사용한 150% 함수비로 슬러리 압밀방법을 사용하여 면모구조의 시료를 만들었으며, 또한 이 용액에 2%의 Calgon을 첨가하여 이산구조의 시료를 만들었다.

본 연구에서는 시료의 제조 방법은 Hazen 등(1999)의 방법을 따랐다. 면모구조의 시료는 탈기, 탈이온 증류수

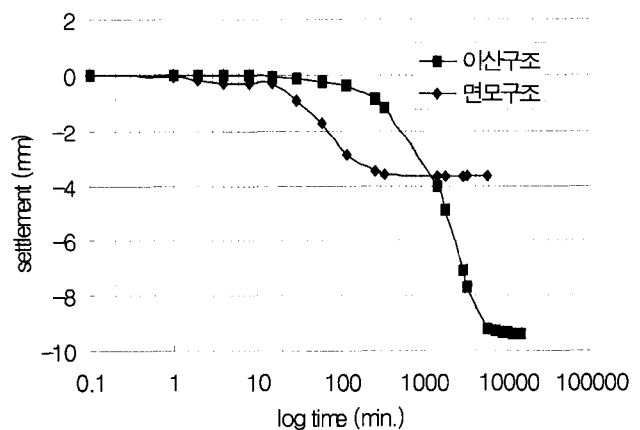


그림 2. 시료의 압밀 곡선

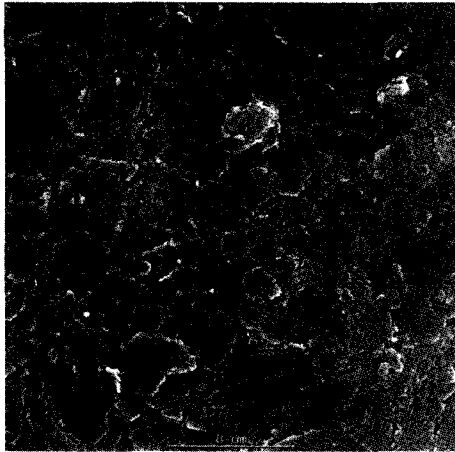


그림 3. 이산구조의 SEM 결과 (3000x)

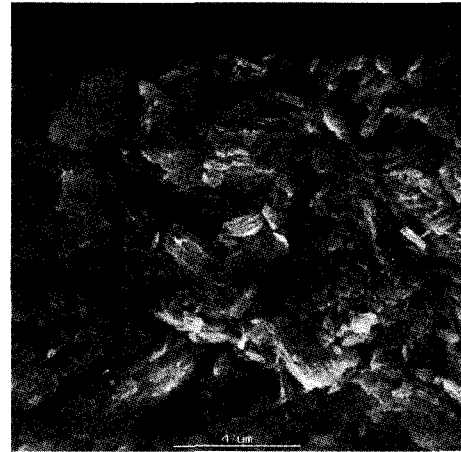


그림 4. 면모구조의 SEM 결과 (6000x)

(deaired, distilled, deionized water)와 카올린점토를 교반기로 혼합하여 만든 함수비 150%의 슬러리를 슬러리 압밀 기법(slurry consolidation technique)을 사용하여 제작되었다. 시료는 압밀장치에서 30KPa까지 단계별로 하중을 가하여 제작하였으며 압밀시간은 8시간정도가 소요되었다. 압밀 후 시료의 함수비는 42%, 단위중량은  $1.74\text{kg/cm}^3$ , 간극비 1.15이었다. 이산구조의 시료는 탈기, 탈이온 증류수에 2%의 헥사메타인산나트륨(Calgon)을 첨가하여 150%의 함수비로 교반기에서 15분 이상 교반한 후 면모구조와 동일한 방법으로 제작되었다. 압밀하중은 면모구조와 같이 30KPa까지 단계별로 가하였으며 압밀시간은 10일 정도가 소요되었다. 압밀 후 함수비는 29%, 단위중량은  $1.88\text{kg/cm}^3$ , 간극비 0.77이었다. 그림 2는 면모구조 및 이산구조의 압밀 곡선을 보여주고 있다.

그림 3과 그림 4는 제작된 이산구조 시료 및 면모구조 시료의 SEM 결과를 보여준다. 그림 3의 이산구조의 시료에서는 입자가 나란하게 수평으로 배치되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 그림 4의 면모구조의 시료에서

는 입자의 배열이 불규칙한 것을 볼 수 있다.

## 2.2 초음파 발진 및 측정 장비

초음파의 발진 장치로는 TB-1000 Gated Amplifier/Receiver Board를 사용하였으며, 데이터의 수집 및 분석 장치로는 Digital Oscilloscope인 Gagescope를 이용하였다. 가진주파수의 크기를 1MHz에서 20MHz로 변화시키며 실험을 실시하였으며 측정 가속도계는 가속도계의 특성에 맞추어 주파수 범위에 따라 선택적으로 사용하였다. 측정 방법은 시편 양단에 가속도계를 부착하여 전파시간을 측정하는 through transmission mode와 가속도계를 하나만 사용하여 왕복하는 파의 시간을 측정하는 pulse/echo mode가 일반적으로 사용되고 있는데 본 연구에서는 pulse/echo mode를 사용하여 측정하였다. 그림 5(a)는 시험 장치의 개요도를 보여주고 있으며, 그림 5(b)에는 시료에 가속도계가 부착된 모습을 보여주고 있다.

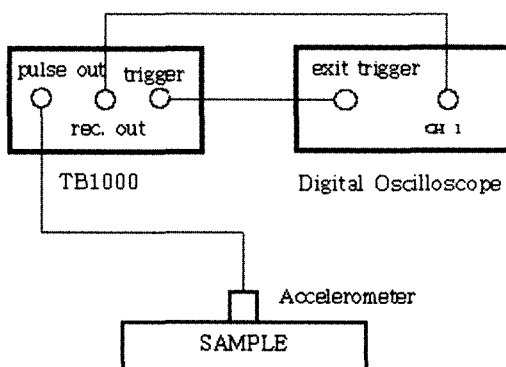


그림 5(a). 시험 장치 setup 개요

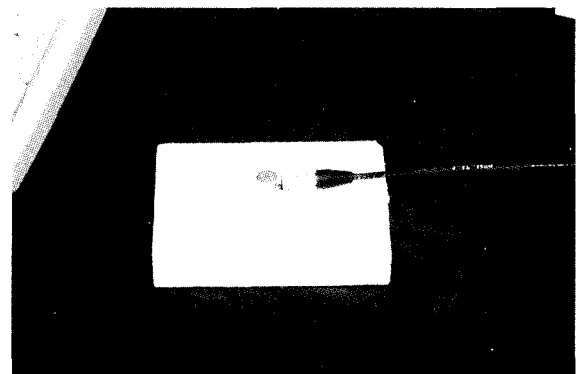


그림 5(b). 시료에 가속도계가 부착된 모습

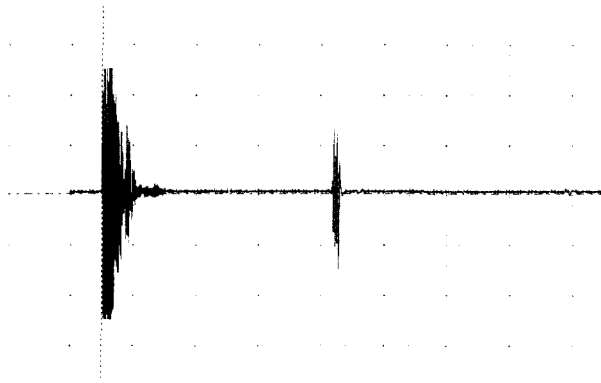


그림 6. Gagescope의 대표적인 화면(2MHz)

### 3. 실험

전파속도에 대한 미세구조의 영향을 알아보기 위하여 시료의 길이, 가진주파수, 전파방향, 시료의 형상 등에 변화를 주어 실험을 실시하였다. 그림 6은 Gagescope

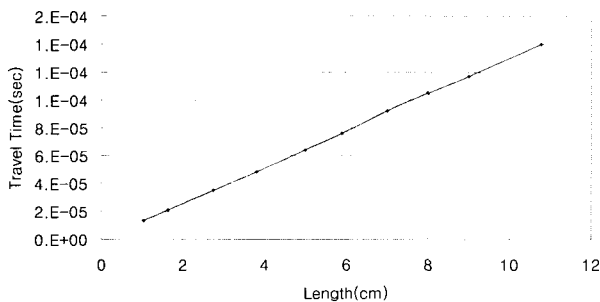


그림 7. 두께에 따른 전파속도 (1 MHz) -이산구조

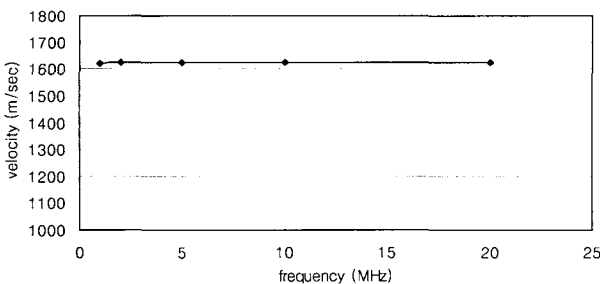


그림 8. 주파수 영향 (이산구조)

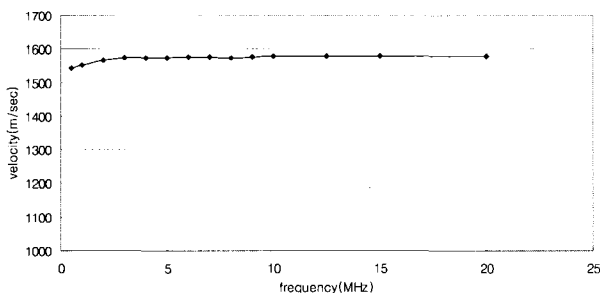


그림 9. 주파수의 영향 (면모구조)

의 대표적인 화면으로 이산구조의 시료에 대한 2MHz의 경우 획득된 파이다. 파가 도달되는 시간은 신호 확대기능을 이용하여 비교적 정확하게 측정할 수 있었다. 본 측정 예의 시료의 두께는 7.121cm이었으며, 전파시간은 0.0000875sec이었다. 따라서 전파속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V = \frac{L}{T} = \frac{2 \cdot 7.121}{0.0000875 \cdot 100} = 1625.8 \text{ m/sec} \quad (1)$$

#### 3.1 시료 두께의 영향

Stephenson(1978)은 실트에 대한 초음파 실험을 통하여 시료의 길이가 6.25cm일 때 가장 선명한 신호를 얻을 수가 있다고 하였다. 본 실험에서는 시료의 길이를 1-11cm까지 1cm 간격으로 변화시키면서 P파 속도를 측정함으로써 시료 두께에 대한 영향을 조사하였다. 측정 결과 그림 7에서 보는 바와 같이 전파시간이 두께에 대하여 선형적으로 증가함으로써 본 실험에 사용된 시료의 경우는 두께의 영향은 보이지 않았으며 전 두께에 대해 선명한 신호를 얻을 수 있었다. 이는 그 동안 측정 장비의 개선으로 비교적 미세한 신호도 측정할 수 있게 되었기 때문으로 본 장비의 경우 시료 길이 10cm내에서는 길이에 관계없이 선명한 신호를 볼 수 있었다.

#### 3.2 주파수 영향의 조사

일반적으로 주파수가 증가함에 따라 속도도 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 가진주파수를 1MHz에서 20MHz까지 변화시키며 전파 속도를 측정하였다. 그 결과는 그림 8 및 그림 9와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 이산구조의 경우 측정된 범위에서 주파수의 영향은 보이지 않는 것으로 나타났으며, 면모구조의 경우는 3MHz까지의 낮은 주파수영역에서는 주파수의 증가에 따라 전파 속도는 다소 증가하는 경향을 보였으나 3MHz 이상 고주파영역에서는 거의 일정한 값을 보이고 있어 주파수의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다

#### 3.3 전파 방향에 따른 영향

전파 속도의 방향성을 조사하기 위하여 수직 및 수평 방향에 대한 속도를 비교 조사하였다. 실험 결과는 표 1과 같다. 수평방향의 속도는 시료의 상단, 중앙 및 하단

표 1. 방향에 따른 전파속도의 영향

전파방향 \ 점토구조	면모	이산
수직(m/sec)	1537	1606.9
수평(m/sec)	1515	1626.5

에서 각각 시험이 실시되었으며 그 결과는 유사한 것으로 나타났다.(표 2 참조) 면모구조에 대한 시험의 경우 수직방향의 속도가 수평방향이 속도보다 다소 크게 나타났으며 이산구조의 경우에는 수직방향의 속도가 수평방향의 속도보다 다소 작게 나타났으나 두 시료 모두 수직 및 수평 방향의 속도 차이가 1% 내외로 그 영향은 매우 적은 것으로 나타났다.

### 3.4 시료 형상의 영향

시료 형상에 따른 영향 유무를 조사하기 위하여 압밀 상자에서 추출한 원통형시료와 이를 직사각형으로 깎아 제작한 시료에 대하여 각각 전파속도를 측정하였다. 수평방향의 속도는 상부, 중앙부 및 하부에 대하여 측정된 전파 속도가 표 2에서 보는 바와 같이 깊이에 따라 거의 일정한 값을 보여 시료의 상태가 균일하게 제작되었음을 보여주었다. 수직방향과 수평방향의 속도 측정 결과는 완전히 일치하여 시료의 형상은 본 연구에서 사용된 시료의 경우 전파 속도에 영향을 미치지 않았다.

### 3.5 감쇠의 영향

시료에 대한 감쇠의 영향을 조사하기 위하여 박편의 시료에 대하여 시험을 실시하였다. 두께가 두꺼운 시료의 경우 명확한 신호를 보기에 어려움이 있어 면모구조의 경우 0.273cm, 이산구조의 경우는 0.317cm의 비교적 박편시료에 대하여 시험을 실시하였다. 그림 10은 가진 주파수 1MHz의 경우 감쇠 시험 결과를 보여주는 대표적인 그림이다. 그림에서 윗선은 이산구조의 실험 결과를 보여주는 것으로 파가 5번 이상 왕복하여도 비교적

표 2. 측정 위치별 전파속도 (이산구조)

주파수(MHz)	속도(하부)	속도(중앙부)	속도(상부)
1	1627.6	1622.1	1631.4
2	1627.6	1625.8	1625.8
5	1625.8	1623.9	1625.8
10	1625.8	1623.9	1625.8
20	1629.5	1625.8	1631.4

큰 진폭을 유지하고 있음을 보여준다. 이에 반하여 그림에서 면모구조의 실험 결과인 아래 선에서는 3번 정도 파가 왕복을 하면 진폭이 크게 감소하여 읽기가 어려웠다. 이러한 경향은 실험을 실시한 주파수 범위에서 볼 수 있었다. 이와 같이 면모구조의 경우가 이산구조의 경우에 비하여 감쇠가 큰 것을 알 수 있었다.

전파되는 파의 진폭은 일반적으로 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$A_n = A_1 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

여기서  $A_n$ 은 n번째 도달되는 파의 진폭이고,  $A_1$ 은 첫

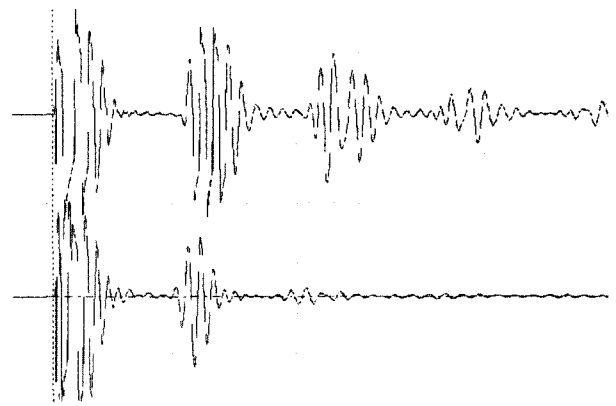


그림 10. 감쇠시험 결과 (상-이산구조, 하-면모구조)

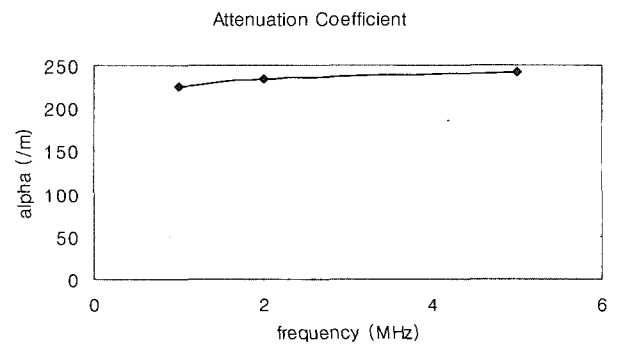


그림 11. 감쇠계수,  $\alpha$  (면모구조)

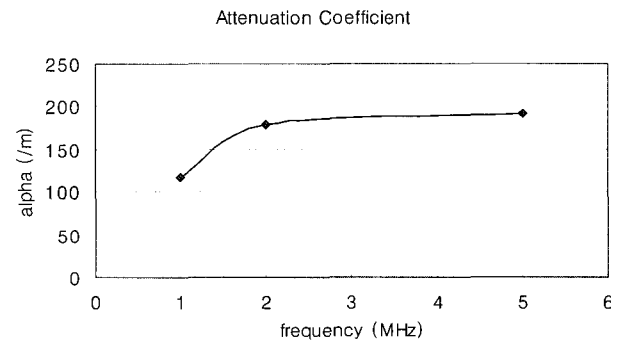


그림 12. 감쇠계수,  $\alpha$  (이산구조)

번째 파의 진폭이다.  $a$ 는 감쇠계수로 무차원량이며,  $x$ 는 전파거리이다. 상기 식을 정리하여 대수를 취하면 다음 식과 같이 되어 감쇠계수를 구할 수 있다.

$$\log(-ax) = \frac{A_n}{A_1} \quad (3)$$

그림 11은 면모구조에 대하여 실험한 결과로 주파수의 변화에 따른 감쇠계수의 변화를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 주파수의 증가에 따라 감쇠계수  $a$ 는 다소 증가하는 경향을 보였으나 1MHz에서 5MHz로 증가함에 따라 7.5% 증가하여 그 영향은 그다지 크지 않았다.

그림 12는 이산구조 시료에 대해 주파수에 따른 감쇠계수의 변화를 보여준다. 이산구조의 경우에도 주파수의 증가에 따라 감쇠계수,  $a$ 도 증가하는 경향을 보였으며, 1MHz에서 5MHz로 증가함에 따라 64% 증가를 하는 것으로 나타나 면모구조보다 주파수의 변화에 보다 예민하게 반응하는 것을 알 수 있었다.

이산구조의 감쇠계수는 면모구조의 값보다 적게 나타났다. 낮은 주파수 영역에서 미세구조의 영향이 커서 1MHz 영역에서는 미세구조 간에 1.9배의 차이를 보였으나, 5MHz 영역에서는 1.25배 차이를 나타내어 주파수가 증가함에 따라 미세구조의 영향은 감소하는 경향을 나타내었다. 본 연구에서는 초음파를 이용하여 실험을 실시함에 따라 저주파수의 영향은 조사가 되지 못하였다. 저주파수 영역대에서의 측정이 가능한 실험법을 이용한 보완이 추후 이루어져야 할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 초음파실험을 통하여 카울린 점토에서의 P파의 속도 및 감쇠 특성을 조사하였다. 시료는 슬러리 압밀방법을 사용하여 면모구조와 이산구조를 인공적으로 만들어 미세 구조에 따른 영향을 조사하였으며 조사 결과 초음파의 속도는 미세구조의 영향을 크게 받지 않은 반면 감쇠는 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 가진주파수를 1MHz에서 20MHz까지 변화시키며 실험을 실시하였으며, 측정 결과 주파수의 증가에 따라 점토의 미세구조에 상관없이 전파속도는 증가하는 경향을 보였으나 3MHz 이상에서는 거의 일정한 값을 보였다.

- (2) 두께의 영향을 보기 위하여 1cm 간격으로 11cm까지 시료의 두께를 변화시키며 실험을 실시하였으며, 분석 결과 시료 두께는 측정에 영향이 없는 것으로 보인다. Stephenson은 6.25cm의 두께 시료가 가장 선명한 파를 보여준다고 하였으나 최근 장비의 개선으로 실험을 실시한 전 두께에 대하여 선명한 파의 관찰이 가능하여 이러한 문제는 극복되었다.
- (3) 원통형 시료와 직사각형 시료에 대하여 전파 속도를 측정하여 본 결과, 두 경우 파의 속도가 일치하여 시료 형상의 영향은 없는 것으로 보인다.
- (4) 수직방향과 수평방향의 속도를 측정해 본 결과, 본 실험에서 제작된 시료의 경우 이산구조의 경우는 수평방향의 속도가 수직방향에 비하여 0.9% 큰 것으로 나타났으며, 면모구조의 경우에는 수직방향의 속도가 수평방향의 속도에 비하여 1.5% 크게 나타나 본 실험에서 제작된 시료의 경우 방향의 영향은 크지 않았다.
- (5) 이산구조의 시료의 전파 속도가 면모구조의 시료의 전파 속도에 비하여 5~7% 빠른 것으로 나타났으며 이는 간극비, 밀도 등의 영향으로 판단된다.
- (6) 파의 감쇠는 면모구조의 시료가 이산구조의 시료의 경우보다 큰 것으로 나타나 파의 감쇠에 점토의 미세 구조가 영향을 미침을 알 수 있었다.
- (7) 감쇠계수는 주파수의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났으며 면모구조보다 이산구조에서 더 예민하게 반응하였다. 낮은 주파수 영역에서 미세구조의 영향이 크게 나타났으며, 주파수가 증가함에 따라 그 영향은 감소하였다. 본 연구에서는 초음파를 이용하여 실험이 진행됨에 따라 저주파수 영역에 대한 영향은 조사되지 못하였으며 추후 보완이 되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 사의를 표합니다.

#### 참고 문헌

1. Barden, L., and Sides, G., "Sample Distribution in Investigation of Clay Structure", *Geotechnique*, Vol.21, No.3, 1971, pp.211-222.
2. Hazen I., and Penumadu D., "Resonant Column Testing of Clay Specimens with Controlled Microfabric", Report No.99-2, Clarkson

- University, 1999, p.139.
3. Martin, R. T., "Quantitative Fabric of Consolidated Kaolinite", Massachusetts Institute of Technology, Research Report R65-47, *Soils Publication*, No.179, September, 1965.
  4. Nazli Yesiller, Gokhan Inci, and Carol J. Miller, "Ultrasonic Testing for Compacted Clayey Soils", *Geotechnical Special Publication*, No.99, Advances in Unsaturated Geotechnics, Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000, Sponsored by the Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, 2000, pp.54-68.
  5. O'Brien, N., "'Fabric of Kaolinite and Illite Floccules", *Clays and Clay Minerals*. Vol.19, 1971, pp.353-359.
  6. Sheeran, D. E., Baker, W. H. and Krizek, R. J., "Experimental Study of Pulse Velocities in Compacted Soils", Highway Research Record, NO. 177, Highway Research Board, 1967, pp.226-238.
  7. Sides, G., and Barden, L., "The Microstructure of Dispersed and Flocculated Samples of Kaolinite, Illite and Montmorillonite", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.8, 1971, pp.391-399.
  8. Sologyan, A. I., "Survey of Methods and Means for Determining Soil Density in the Field", Soviet Journal of Nondestructive Testing, Plenum Publishing Corp., Vol.25, No.7, 1990, pp.480-486.
  9. Stephenson R. W., "Ultrasonic Testing for Determining Dynamic Soil Moduli", *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP 654, *American Society for Testing and Materials*, 1978, pp.179-195.
  10. Wang, R., Haibo, G., Ay, C., Schuler, R., Gunasekaran, S., and Shinnars, K., "Ultrasonic Method to Evaluate Soil Moisture and Compaction", presented at 1991 International Winter Meeting, Paper No.91-1522, ASAE, St. Joseph, MI., 1991.

(접수일자 2002. 6. 14, 심사완료일 2002. 12. 10)