

## High pH 및 Low pH grout의 탄성계수 및 탄성과 속도 분석

김규원, 김진섭, 조원진

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 덕진동 150-1

[romvykim@gmail.com](mailto:romvykim@gmail.com)

### 1. 서론

고준위 폐기물의 심지층 처분을 위해 처분장의 내구성을 고려하여 시멘트 물질의 사용이 불가피한 상황이다. 하지만 이러한 시멘트 물질의 사용은 높은 pH (>12.5)로 인하여 초염기성 상태를 유발하기 때문에 완충제 역할을 하는 벤토나이트나 주변 암반의 물리·화학적 거동에 지대한 영향을 미친다. 이와 같이 시멘트를 사용함에 있어 pH의 영향을 높이 고려해야 하는 상황에서 Low pH 시멘트의 중요성은 더욱 부각되고 있다. 이러한 시멘트 물질은 또한 최소 10만년 이상의 초장기 노출을 목표로 하기 때문에 내구성 측면에 대한 상당 기간의 실증이 필요하다. 건설 재료를 평가하기 위해 많은 요소들이 고려되어야 하지만 그 중 stiffness, 즉 탄성계수는 빼놓을 수 없는 중요한 인자이다. 또한 이러한 탄성계수들과 깊은 관계를 가지는 것이 탄성과 속도이다. 본 연구에서는 FFRC (Free Free Resonant Column) 실험을 통하여 High pH (보통) grout와 Low pH grout의 탄성과 속도를 구하고, 건조시켰을 때와 포화되어 있을 때에 따른 변화를 관찰함으로써, 시멘트 내에서 공극률과 공극내의 시스템 그리고 배합의 차이가 탄성과 속도에 어떠한 영향을 미치는지 알아보는 것이 목적이다.

### 2. 실험방법 및 결과

#### 2.1 실험 setup 및 방법

시편의 배합은 표 1 과 같이 실행하였다. Low pH 시편의 경우 시멘트 이외에 실리카 폼을 추가하는데 이는 콘크리트의 유동화적 특성을 변화시켜 블리딩과 재료분리를 감소시키고 또한 시멘트의 양을 상대적으로 줄임으로써 pH를 낮추는 장점까지 가지고 있기 때문이다. 실험의 순서는 다음과 같다. 직경 50mm, 높이 100mm인 시편을 제작하여 실에 매달아 양 끝단을 free-free 조건으로 만든 후에 한 끝단엔 작은 망치로 반대쪽 끝단에서 가해진 신호를 감지할 수 있는 가속도계를 부착한다. Time domain 신호를 오실로스코프로 수신한 후, FFT(Fast Fourier Transform)을 이용하여 frequency domain 신호로 변환한다. 이 때 peak 인 frequency를 first mode resonant frequency라 그러며 이를 first mode의 wavelength 즉 시편의 높이의 2배 (왕복거리)와 곱해주면  $V_{rod}$ 를 구할 수 있다.  $V_{rod}$ 를 구하면 식 1, 2, 3을 사용하여  $V_p$ ,  $V_s$ , E, M, G 등을 구할 수 있다. 탄성과 속도  $V_{rod}$ ,  $V_p$ ,  $V_s$ 와 탄성계수 E, M, G 사이의 관계는 다음과 같이 정리 할 수 있다 [1].

$$V_{rod} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

식 1.  $V_{rod}$  와 E

$$V_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$

식 2.  $V_p$ 와 E, M

$$V_s = \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)} \frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

식 3.  $V_s$ 와 E, G

여기서,  $V_{rod}$ : Rod wave velocity,  $V_p$ : P-wave velocity,  $V_s$ : S-wave velocity, E: Young's modulus, M: Constraint Modulus, G, Shear modulus,  $\rho$ : density 그리고  $\nu$ : Poisson's ratio 이다.

표1. 그라우트 시편 배합비율 [2] (단위: kg/m<sup>3</sup>)

	High pH	Low pH 1	Low pH 2
물(초유동화제 포함)	716	789	709
시멘트 (쌍용 마이셀 8000)	882	328	455
실리카 폼 (Microsilica 940U)	0	226	313
초유동화제 (PNS ROADCON-SP)	7	8	12
Water-Binder ratio	0.81	1.02	0.92

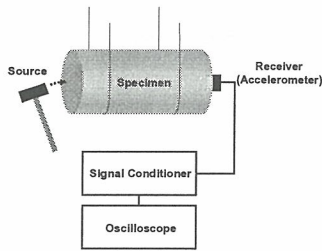


그림 1. Test setup

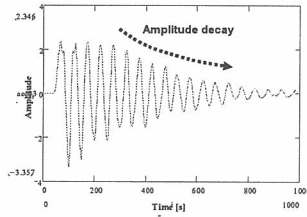


그림 2. Time domain 신호

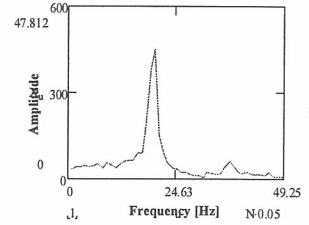


그림 3. Frequency domain 신호

### 2.2 실험 결과 및 고찰

실험을 통해 그림 4와 표2와 같은 결과를 얻을 수 있었다. HP 시편의 탄성과 속도는 LP 시편의 탄성과 속도보다 월등히 높은 수치를 보인다. 이는 탄성파가 입자, 물, 공기로 구성된 시스템 내에서 주로 입자 사이로 전파되기 때문에, 공극률이 작을수록 탄성과 속도는 더 크게 나타나기 때문이다. 또한 배합시 LP 시편의 경우 실리카 폼의 첨가 없이 오로지 시멘트만으로 배합이 이루어지기 때문에 건조밀도가 높아지고 그로인해 강도증가가 발생하여 탄성과 속도가 높아지는 것이다. 포화된 상태에서의 탄성과 속도와 공극률은 HP, LP2 그리고 LP1 순이다. 하지만 건조시킨 후에 탄성과 속도는 HP, LP1, LP2 순으로 나타났다. 이는 건조를 시키면서 LP2 시편에서 건조수축이 일어나면서 표면과 내부에 미세 균열들이 많이 발생하기 때문이다. 실험결과를 보면 건조된 상태에서의 탄성과 속도가 포화 되었을 때랑 비교했을 때 훨씬 작은 값을 보임을 알 수 있다. 이는 탄성파는 주로 입자 사이로 전파되지만, 입자가 아닌 부분(공극) 내에서는 탄성파의 전파가 공기가 아니라 물을 통해 주로 이루어지기 때문이다. 따라서 공극 내에 물이 더 많을수록 탄성과 속도는 증가한다.

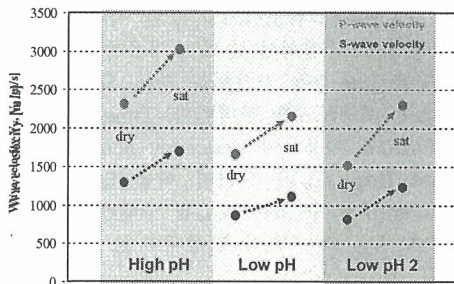


그림 4. FFRC 실험 결과

	Sat. HP	Dry HP	Sat LP1	Dry LP1	Sat. LP2	Dry LP2
$V_{rod}$ [m/s]	2707.3	2064	1793.3	1387.3	1975.6	1303.8
$E$ [GPa]	11.93	6.73	4.43	2.27	5.8	2.38
$V_P$ [m/s]	3026.4	2307.2	2145.2	1659.6	2292.2	1512.7
$V_S$ [m/s]	1698.7	1295.1	1103.7	853.4	1225.2	808.6
$M$ [GPa]	14.9	8.43	6.3	3.3	7.8	3.2
$G$ [GPa]	4.67	2.63	1.63	0.87	2.22	0.92
Damping ratio	0.023	0.027	0.023	0.044	0.025	0.053
Poisson's ratio, $\nu$	0.27		0.32		0.3	
porosity	0.03		0.13		0.064	

표 2. FFRC 실험 결과

### 3. 결론

본 연구에서는 HP와 LP 그라우트의 탄성과속도와 탄성계수들을 각각 FFRC 실험을 통하여 산출해 내었고, 탄성과 속도가 배합비율, 포화도와 공극 내의 system에 따라서 어떻게 변하는지 알아보았다. 일련의 실험을 통하여 HP 그라우트에서 탄성과속도, 탄성계수가 월등히 높고, 공극률이 낮게 나오는 것을 알 수 있었다. 또한 LP1 과 LP2 시편을 나누어 비교하였으며, LP2 시편에서의 탄성과 속도가 포화도에 따라서 더욱 많이 차이 나는 것을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] Cha and Cho, Compression wave velocity of cylindrical rock specimens: Engineering modulus interpretation, JJAP, Vol. 46, No. &B, pp. 4497-4499, (2007)
- [2] Orantie and Kuosa, Durability 2007 Injection grout investigations: Background description, (2008).