

소금 고결화에 따른 강성 특성

Stiffness Characteristics according to Salt Cementation

엄용훈¹⁾, Yong-Hun Eom, 쫁팡홍²⁾, Q. Hung Truong, 유정동²⁾, Joung-Dong Yoo, 변용훈¹⁾, Yong-Hoon Byun, 이종섭³⁾, Jong-Sub Lee

¹⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

SYNOPSIS : Soils containing vanishing materials lead changes in the microstructure of particulate media due to water inflow. Thus, dissolution renders some local unstability. As the moisture contents decrease, the component of the vanished materials may affects on the cementation of paniculate materials. This cementation phenomenon has a huge influence on the stiffness, strength and stability under lower stress level. The goal of this study is to introduce the cementation effects on a compressional wave velocity, a shear wave velocity, and the resonant frequency of shear waves. The glass bead and salt water with different mole contents are used. Test results show that the changes of shear and compressional wave velocities consist of three stages. In the first region, compressional wave velocities increase and shear wave velocities decrease with a decreases in reducing water contents from 100% to 90~95%. In the second region, shear and compressional wave velocities become stable at 90~95% to 10% of the water contents. In the third region, shear and compressional wave velocities increases dramatically with a decrease in the water content due to the capillary force and cementation of salt. Furthermore, the resonant frequency of the shear waves shows similar phenomenon. Specimens prepared by glass beads and salt water are proved to be able to provide a meaningful insight in under structural behaviors of the cementation.

Keywords : Cementation, Shear wave, Compressional wave, Resonant frequency, Stiffness

1. 서론

세계의 많은 지역은 아열대기후와 건조기후에 속해 있다. 이들 지역의 대부분은 과거 바다와 인접한 연안 지역이었으나 기후의 변화로 인해 현재는 강수량이 증발량에 비해 턱없이 부족한 지역이다. 이러한 지역의 지반 특징은 지반 내 많은 용해 성분을 포함하고 있다는 것이다. 따라서 구조물 건축시 사용되어지는 상당량의 수분이 이러한 지반 내로 스며들어 입자의 용해를 야기시킨다(Mikheev and Petrukhin 1973).

발생된 입자 용해는 지반 내에 국부 간극의 증가로 이어져 구조물의 불안정은 물론 구조물과 시공 장비들의 하중으로 인해 압밀 침하를 초래할 수 있다. 그러나 수분의 유입량이 없어지게 되면 지반은 다시 안정성을 갖게 된다. 또한 기존의 용해 성분의 물리적, 화학적 변화로 인하여 흙 입자간의 고결화를 발생시키게 된다. 이때 발생하는 고결화의 특징은 아주 적은 고결성분으로도 미소변형강성 및 액상화에

대한 저항력을 크게 향상시킨다(Yun and Santamarina 2005). 즉, 흙의 강도는 증가되고 압밀량은 감소되어 결과적으로 흙의 강도를 증가시키는 중요 요인이라 할 수 있다(Asghari et al 2003).

과거 고결화에 대한 정의는 탄산칼슘과 같은 물질이 입자 사이나 입자표면에 고착되어 입자간의 결합력을 증대시키는 현상을 의미한다. 그러나 해안 연안 지역의 경우 탄산칼슘과 같은 용해 가능성분 이외에 염화나트륨과 같은 염분을 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 나아가 염분 농도에 따른 고결화에 대한 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 글라스 비즈와 소금물을 이용하여 시료의 고결화에 대해 실험을 실시하고자 한다. 이를 통해 소금과 글라스 비즈 입자간의 고결화에 따른 강성을 알아보하고자 한다. 먼저 글라스비즈를 사용하여 시료를 조성하고 소금물의 농도를 0.0~2M까지 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 또한 글라스비즈를 소금물에 포화시킨 후 셀을 건조기에 넣어 건조시켜 가면서 변화 추이를 관찰하였다. 적당한 시간 간격으로 포화도에 따른 전단파 속도변화를 측정하였다. 측정결과를 바탕으로 소금물 농도에 따른 전단파 신호와 탄성과 신호를 함수비의 변화량과 함께 분석을 실시하였다.

2. 실험 방법

글라스비즈를 사용한 이번 연구에서는 소금의 농도를 달리하여 이에 따른 고결화 거동특성을 자유구속 하에서 아크릴 셀을 이용하여 평가하였다. 고결화는 고결정도, 상대밀도, 구속압, 고결시 상재하중 및 입자의 특성에 영향을 받는다(Christopher 등 1989; Ismail 2002a; Ismail 2002b). 선행 연구에서 많은 고결화 요인 중 고결정도와 입자의 특성 이외의 요소에 의한 영향을 최대한 배제시켜 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시료 특성, 시료 조성 그리고 실험 과정은 다음과 같다.

2.1 시료의 기본특성

본 연구에 사용된 글라스비즈는 그림 1과 같다.

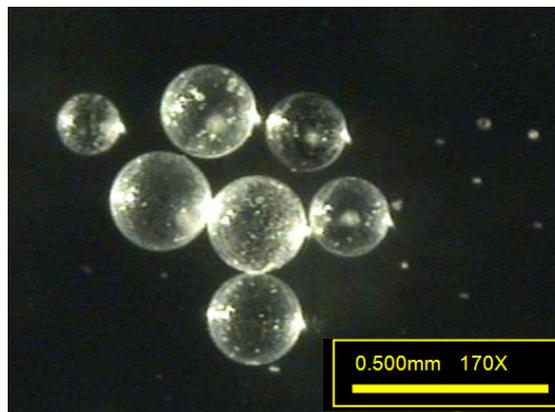


그림 1. 글라스비즈의 입자모양

입자크기의 범위는 약 0.106~0.310mm이다. 기본 물성치와 입도곡선은 각각 표1과 그림 2에 나타내었다. 사용된 글라스비즈의 성분은 이산화규소(SiO₂), 산화칼슘(CaO), 산화나트륨이 90% 이상을 차지하며 70%가 넘는 이산화규소를 함유한 실리카질 글라스비즈이다. 사용된 소금은 염화나트륨 함유율이 90% 이상인 것을 사용하였고, 비중은 2.16이다.

표 1. 글라스비즈의 기본 물성치

분류	Glass beads
경도(kgf/mm ²)	425
마모도	3.14
비중(N/mm ²)	2.52
압축강도(N/mm ²)	16.64
굴절지표	1.5~1.64
유효입경, D ₁₀ (mm)	0.17
평균입경, D ₅₀ (mm)	0.26
Thermal Counductivity(Kcal/m·hr·°C)	0.65

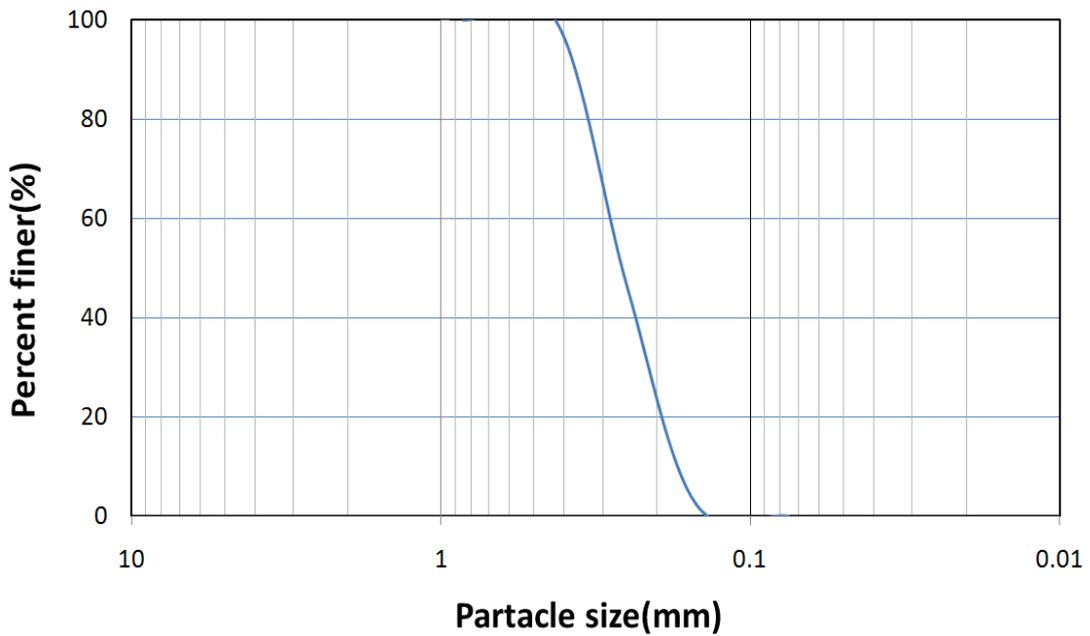


그림 2. 글라스비즈의 입도분포

2.2 시료조성

글라스비즈와 소금물을 0.0M, 0.1M, 0.5M, 1.0M, 2.0M로 농도를 변화시켜 각각 시료를 조성하였다. 이때, 글라스비즈를 오븐에 넣어 완전 건조시켜, 입자사이에 존재할 수 있는 수분으로 인하여 소금물과의 혼합시 농도가 변하는 것을 방지하였다. 또한 각각의 농도에 따른 소금물 조성시 증류수를 이용하여 이온화에 대한 변수를 최소화하였다. 건조된 시료를 수중낙사법을 사용하여 시료가 100% 포화되도록 하였다. 수중낙사법은 수중에서 퇴적된 자연상태 흙의 구조를 가장 잘 모사할 수 있는 시료조성 방법이다 (Chaney 등 1978, Vaid and Negussey 1984). 이는 고결화에 영향을 미치는 상대밀도에 대한 영향을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 시료조성시 상대밀도에 대한 영향을 모두 배제하는 것은 공학적으로 불가능하다. 따라서 매 실험때마다 사용된 셀에서의 시료 높이를 일정하게 고정함으로써 초기조건을 동일하게 하였다. 또한 수중낙사법은 퇴적 과정에서 재료분리를 일으킬 수도 있으나 본 실험에서는 한가지 재료만을 사용하므로 이와는 무관하다. 사용된 셀은 정사각형으로 내부 가로, 세로 길이 모두 74mm이며, 전체 높이는 55mm이고 내부 높이는 45mm로써 바닥면의 두께는 10mm로 구성되어 있다. 재질은 투명 아크릴을 사용하였다.

2.3 실험과정

각각의 소금물 농도에 따른 시료가 준비된 아크릴 셀을 건조기에 넣어 포화도를 변화시켜 가면서 전단파와 탄성파를 측정하였다. 최초 시료 조성시 상대밀도와 수위를 동일하게 유지하였으며 시료 내 소금물이 완전히 건조되어 더 이상의 무게 변화가 발생하지 않는 시점까지 실험을 수행하였다. 건조기의 온도는 70℃를 유지하였으며 무게측정 시에는 외부충격에 의한 입자의 재배열과 간극비의 변화가 없도록 하였다. 또한 실험은 혼합시료의 고결화 과정에 따른 전해질 용액의 변화를 최소화시키기 위해 외부 온도(25℃)와 습도(60%)를 일정하게 유지하였다. 조성된 시료의 자유구속하중 하에서 고결화에 따른 강성특성평가를 전단파와 탄성파를 이용하여 동일한 포화도에서 측정하였다.

2.4 전단파 측정

조성된 시료의 고결화에 따른 강성특성 거동평가를 위해 전단파(Shear wave) 측정이 가능한 벤더 엘리먼트를 그림 3(a)와 같이 셀의 양쪽 벽면에 설치하였다. 파의 효과적 전달을 위해서 약 5mm 돌출되게 설계되어졌으며 직접파가 아크릴셀을 통해 전달되지 않도록 나일론 재질의 스크류와 테프론 테잎을 이용하여 고정하였다. 발신 및 수신 벤더 엘리먼트 사이의 누화현상을 방지하기 위하여 전도성 페인트를 이용하여 전기적 간섭현상을 차폐시켰다. 전단파는 그림 3(b)와 같이 신호발생기(Agilent 33220A)를 사용하여 20Hz의 전기적 신호를 발신 벤더 엘리먼트에 전달하게 된다. 발신 벤더 엘리먼트에 전달된 전기적 신호는 물리적 신호로 바뀌어 시료를 통과하여 수신 벤더 엘리먼트를 통해 다시 전기적 신호로 획득된다. 획득된 신호는 필터 및 신호증폭기(Krohn-Hite3364)를 이용하여 필터링과 증폭과정을 거치게 된다. 이러한 과정으로부터 최종적으로 얻어진 신호는 오실로스코프에서 디지털화 되었으며, 잡음을 제거하기 위해 1024개의 신호를 평균하여 저장하였다. 전단파의 속도는 획득된 신호를 이용하여 식(1)과 같이 계산하였다.

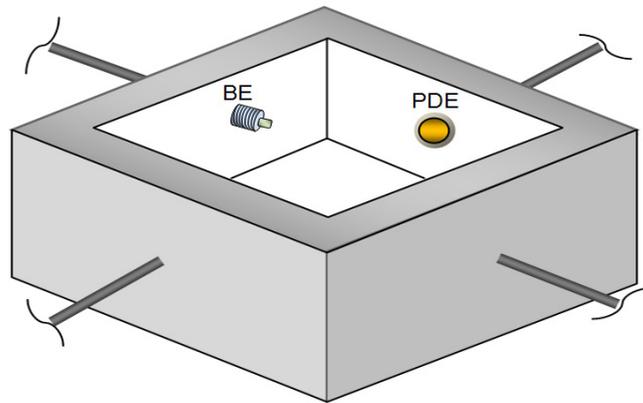
$$V_{P \text{ or } S} = \frac{L_{P \text{ or } S}}{t_{P \text{ or } S}} \quad (1)$$

여기서, $L_{P \text{ or } S}$ 는 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트간의 끝단거리를 말하며, $t_{P \text{ or } S}$ 는 전단파 및 압축파의 이동시간을 말한다(Santamarina et al 2001).

2.5 압축파 측정

피에조 디스크 엘리먼트(Piezo Disk element)는 압축파(Compressional wave)의 측정을 위한 트랜스듀서이다. 피에조 디스크 엘리먼트는 그림 3(b)에 설치된 모습과 같이 원형의 금속판의 반대쪽 면에 압전 세라믹 소자가 덮여있다. 압전 세라믹소자의 직경은 11mm, 금속판의 직경은 15mm, 그리고 두께는 0.45mm이다. 피에조 디스크 엘리먼트는 그림 3(a)와 같이 셀의 양쪽 벽면에 설치하였다. 측정 장비 구성은 그림 3(b)와 같으며, 진단과 측정 장비와 동일하다. 피에조 디스크 엘리먼트에서 발생된 신호가 동일한 과정을 거쳐 신호를 획득하게 된다. 압축파 역시 아크릴 셀을 통한 직접과의 전달을 피하기 위하여 셀과 임피던스가 차이가 큰 재료인 실리콘을 사용하여 고정하였고, 이를 통해 댐핑 효과를 최대화하였다.

(a)



(b)

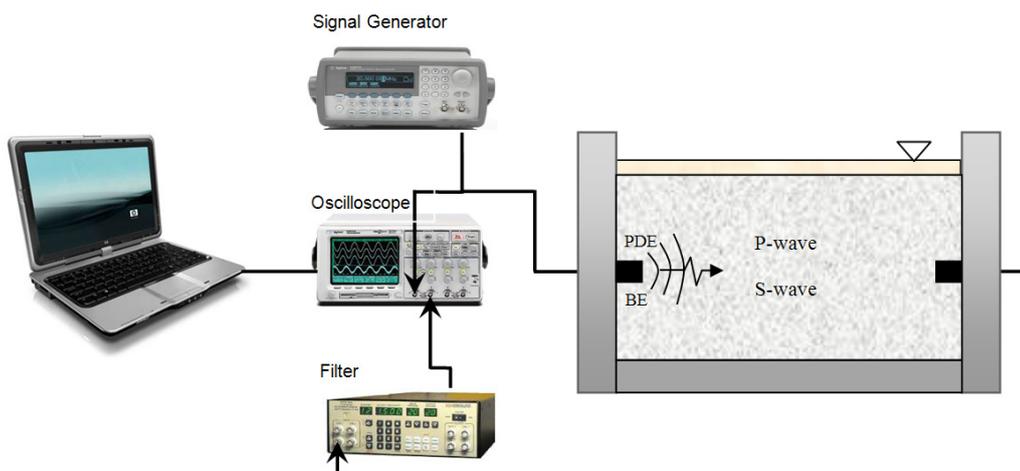


그림 3. (a) 벤더 엘리먼트(BE) 및 피에조 디스크 엘리먼트(PDE) 설치 모식도, (b) 진단과 및 압축파 측정을 위한 주변 장비 구성.

3. 실험결과

본 연구에서는 자유구속조건에서 소금물 농도에 따른 포화도-속도와 포화도-공진주파수의 상관관계를 평가하였다.

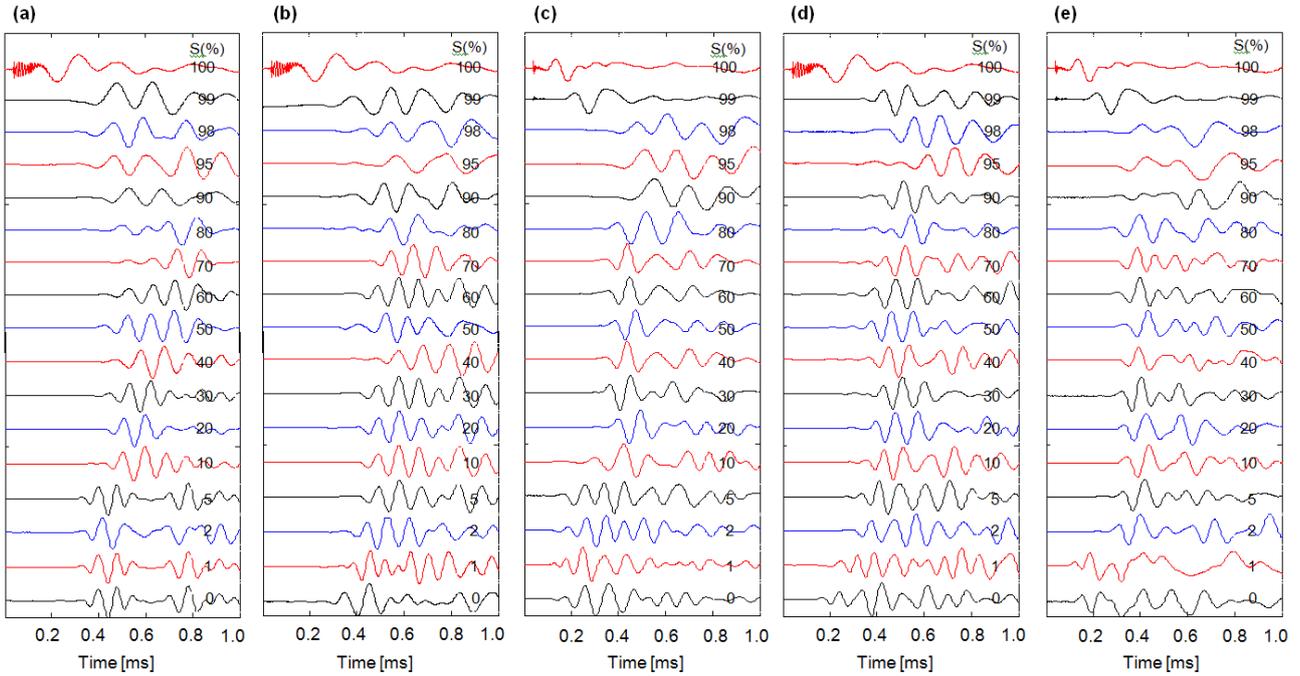


그림 4. 포화도에 따른 전단파 양상 (a) NaCl 0.0M, (b) NaCl 0.1M, (c) NaCl 0.5M, (d) NaCl 1.0M, (e) NaCl 2.0M.

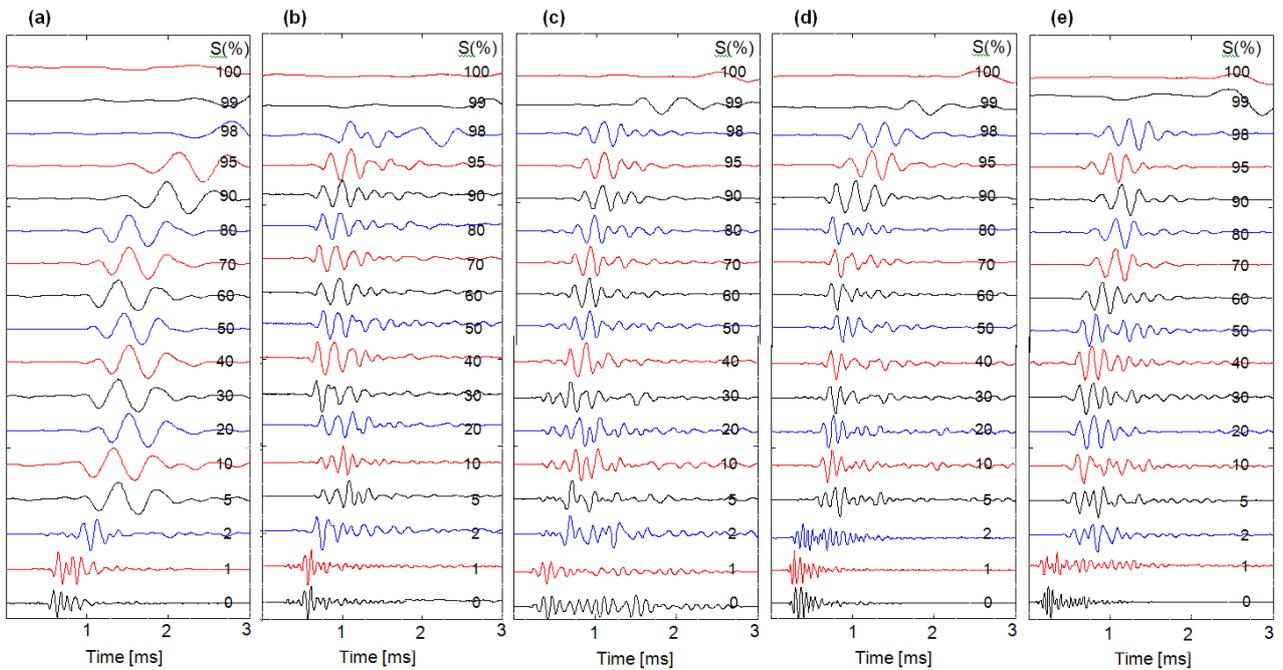


그림 5. 포화도에 따른 압축파 양상 (a) NaCl 0.0M, (b) NaCl 0.1M, (c) NaCl 0.5M, (d) NaCl 1.0M, (e) NaCl 2.0M.

3.1 전단파 및 압축파 양상

소금물과 글라스비즈의 혼합시료에 대해 완전히 포화된 시점부터 완전 건조상태에 이를 때까지 전단파와 압축파를 측정하였다. 소금물의 농도는 0.0M, 0.1M, 0.5M, 1.0M, 2.0M에 대해 각각 실험을 수행하였다. 포화도에 따른 전단파와 압축파의 신호 양상은 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 시료의 포화도가 100%에서 0%로 갈수록 전단파의 초동이 점점 감소한다. 우선 포화도가 100%에서 약 95%까지 변할 때 전단파의 초동은 급격히 감소한다. 두 번째로 포화도가 95%에서 약 5%까지 변화할 때 초동은 큰 변화를 보이지 않는다. 마지막 세 번째 단계, 즉 포화도가 5%~0%구간에서는 전단파의 초동이 급격히 감소한다.

압축파의 경우 시료가 100% 포화되었을 때 초동이 가장 빠른 것을 볼 수 있고, 이후 급격한 감소가 나타난다. 전단파 양상과 비슷하게 포화도가 100%에서 약 97%까지 급격한 감소를 보이다가 97%에서 약 5%까지는 큰 변화가 없다. 이후에 5%에서 0%까지 급격한 감소가 발생한다. 소금물의 농도에 따른 변화는 전단파와 압축파 모두 소금물의 농도가 높아질수록 압축파와 전단파의 초동이 감소함을 알 수 있다.

4. 결과 분석

4.1 속도

그림 4의 전단파의 신호에서 초동을 취하고 식(1)을 이용하여 전단파 속도를 산정하여 그림 6에 나타내었다.

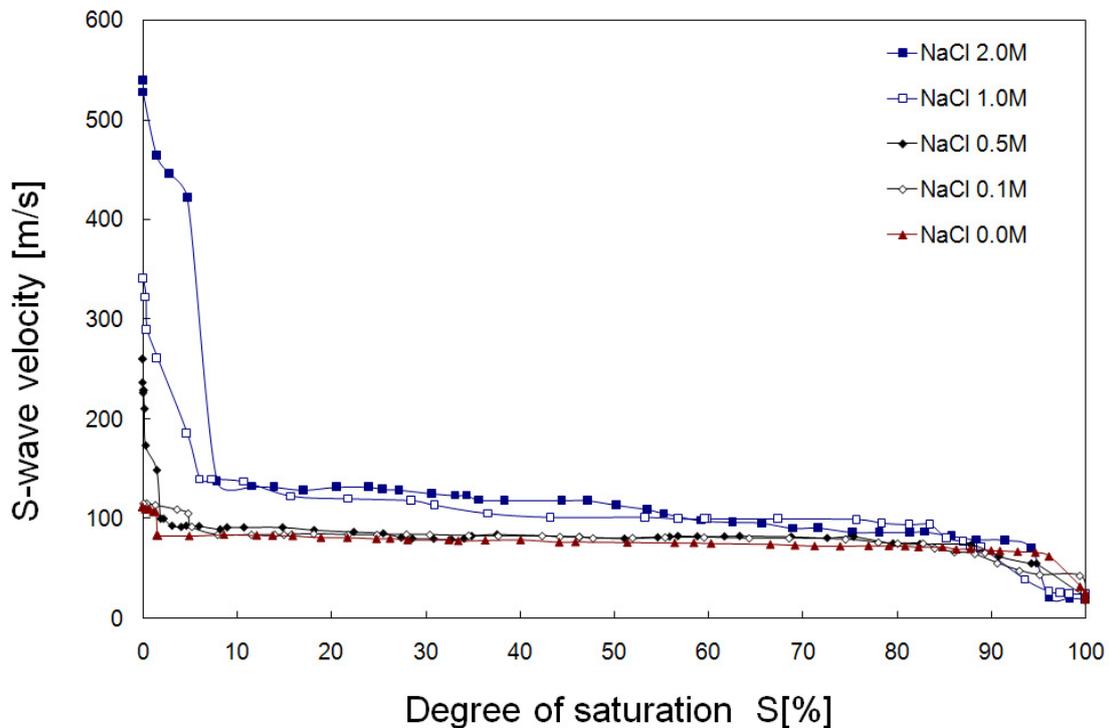


그림 6. 포화도에 따른 전단파 속도

전단파의 속도는 포화도에 따라 세단계의 변화가 있음을 보여준다. 첫 번째 단계는 수증낙사법에 의해 조성된 시료가 완전히 포화를 이룬 상태에서 포화도가 90%가 되는 범위에서 발생한다. 유체를 통과할 수 없는 전단파는 포화상태에서 가장 느린 속도를 나타낸다. 이는 소금의 농도와는 무관하게 20m/s~25m/s로 거의 동일하다. 이후 시료가 완전 포화단계를 거쳐 불포화단계로 접어들면서 속도는 급격히 증가하게 되는데 이때의 속도는 소금물의 농도에 무관하게 모든 농도에서 거의 동일한 변화를 보인다. 두 번째 단계는 시료가 불포화도에 이르러 포화도가 90%에서 10%의 범위에서 나타난다. 이 단계에서는 시료 내 입자간의 접촉면 사이 수분의 증발로 인해 발생되어지며 소폭의 속도증가로 이어진다. 또한 간극의 변화가 거의 없으며 간극의 크기가 유효응력의 영향범위를 벗어나 있는 단계로 전단파의 속도가 간극에 의해 결정되어지는 단계이다. 마지막 단계는 포화도 10%에서 0%인 완전 건조 상태에 이를 때까지의 범위에서 나타난다. 이 단계에서 속도가 가장 많은 변화를 일으키게 된다. 이 단계에서는 두 번째 단계에서 완만히 나타나던 음의 간극수압이 급격히 증가함에 따라 전단파의 속도도 급격한 증가로 이어지게 된다.

그림 7은 압축파의 속도 변화를 나타낸 것이다. 속도 산정은 전단파와 동일하게 식(1)을 사용하였다.

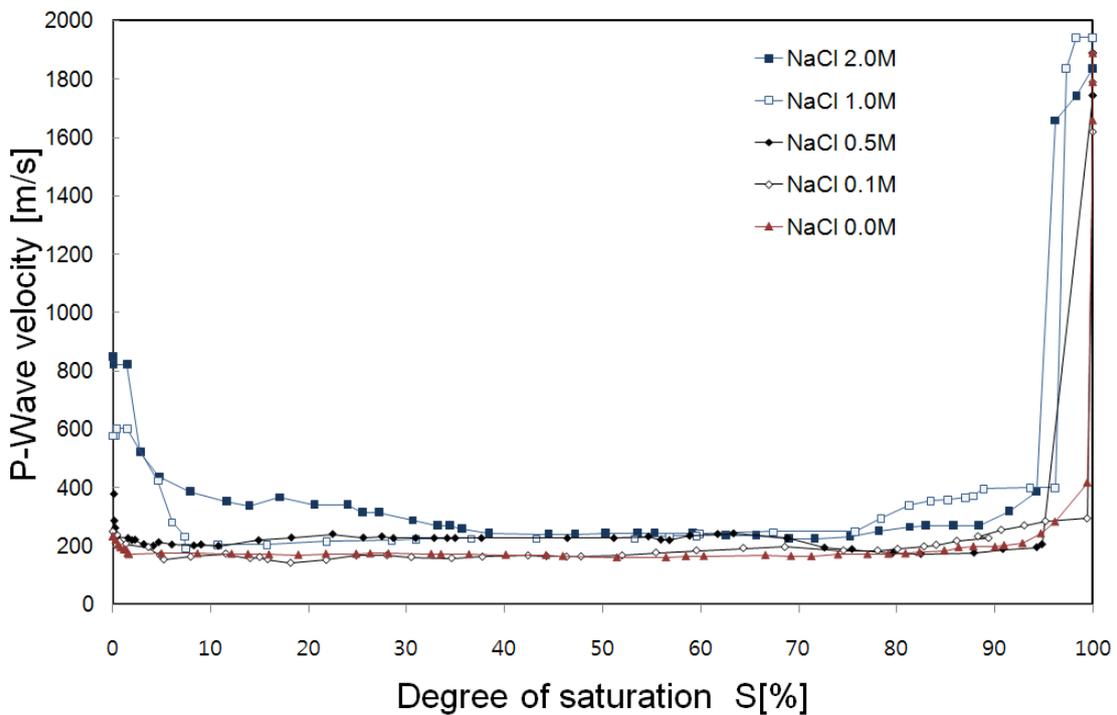


그림 7. 포화도에 따른 압축파 속도

압축파의 속도변화 역시 전단파와 동일하게 세가지 단계로 구분된다. 유체의 압축파의 속도는 1400m/s~2000m/s로 나타난다(Carmichael 1982, 1989; Weast 1988; Guèguen and Palciauskas 1994). 최초 완전 포화된 시료에서 측정된 압축파의 속도는 1900m/s이다. 이후 포화도 95%까지 압축파의 속도는 300m/s까지 급격한 감소를 보인다. 이러한 현상은 유체를 통해서 전달되던 압축파가 시료가 불포화 상태에 이르게 되면서 나타나게 된다. 두 번째 단계는 전단파와 마찬가지로 간극의 크기에 영향을 받아 소폭의 속도 증가를 보인다. 마지막 세 번째 단계에서는 소금의 농도에 따라 다른 변화 양상을 보인다. 즉, 소금의 농도가 증가할수록 높은 포화도에서부터 속도의 급격한 변화를 보인다. 이는 소금의 농도가 높을수록 포화도가 높은 시점에서 입자간 고결화를 유발시키는 것을 의미한다.

사용된 시료의 입자 크기 범위가 0.106~0.310mm이며, 시료높이가 45mm이므로 입자간에 작용하는 힘은 Terzaghi의 유효응력보다는 모세관력에 의해 좌우된다. 그러나 소금의 농도에 따른 속도의 변화를

살펴보면 고결화에 대한 시료의 강성특성 변화에 대한 영향력을 알 수 있다. 소금의 농도에 따른 전단파의 속도 변화는 전단파의 경우, 완전 건조 상태에서의 소금물의 농도가 0M일 때 속도가 110m/s이고 2M에서의 속도는 540m/s로 약 5배의 차이를 보인다. 압축파의 경우, 완전 건조 상태에서의 소금물의 농도가 0M일 때 속도가 230m/s이고 2M에서의 속도는 850m/s로 약 3.5배의 차이를 보인다. 이는 시료의 완전 건조 시 입자 사이에 소금이 연결고리 역할을 함으로서 시료의 고결화를 발생시켜 강성의 증가로 이어지게 되는 것이다. 그러나 소금물의 농도가 증가됨에 따라 시료 건조시 발생되어지는 부피 팽창에 대한 영향은 여전히 배제할 수 없다.

4.2 포화도에 따른 전단파의 공진주파수

포화도와 소금 농도에 따른 전단파의 공진주파수의 변화를 그림 8에 나타내었다.

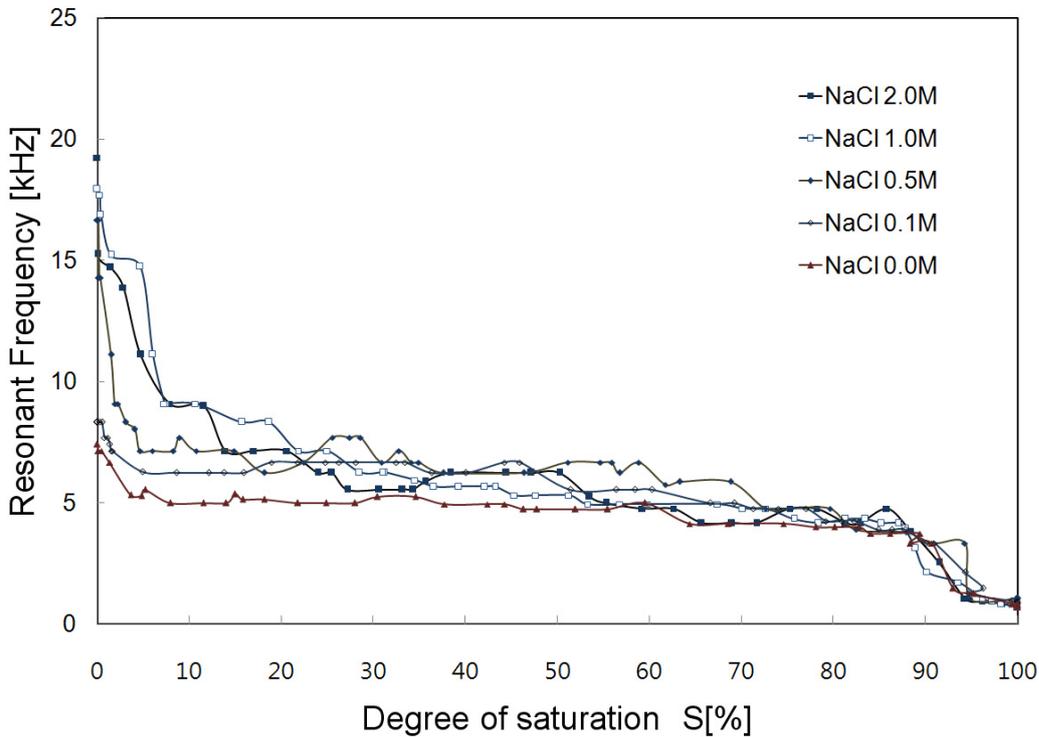


그림 8. 포화도에 따른 전단파의 공진주파수 변화

공진주파수의 변화양상 역시 전단파의 속도 변화양상과 유사하게 세단계로 구분되어진다. 전단파 측정시 사용된 벤더 엘리먼트의 공진주파수는 근접장의 크기, 전단파의 초기 도달시간, 해상도, 그리고 skin depth에 영향을 미친다(Lee and Santamarina 2005). 따라서 공진주파수의 결정은 벤더 엘리먼트의 설계 상수에 있어서 중요한 요인이다. 벤더 엘리먼트의 공기중에서의 공진주파수는 캔틸레버 보의 공진주파수와 동일하게 나타난다. 따라서 캔틸레버 보의 공진주파수에 대한 함수로 벤더 엘리먼트의 설계 시 고려되어야 할 함수를 정의할 수 있다. 탄성계수(E), 단면 2차 모멘트(I), 그리고 단위 길이 당 질량(\bar{m})과 길이(L)인 캔틸레버 보의 공진주파수를 응용하여 흙 속에 존재하는 벤더 엘리먼트의 공진주파수를 유추할 수 있다.

$$f_r = \frac{w}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1.875^4 \frac{EI}{\alpha L^3} + 2V_s \rho_{sl} (1 + \nu)L}{\rho_{bc} b t \alpha L + \rho_{sl} b^2 L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서, V_s 는 전단파 속도, ρ_{sl} 는 흙에서의 단위질량, ρ_{be} 는 벤더 엘리먼트의 단위질량, b 와 t 는 각각 벤더 엘리먼트의 폭과 두께를 나타낸다. α 는 유효 길이 인자로 앵커 효율이 완벽할 때 $\alpha=1$ 이고, 그렇지 않을 경우 $\alpha>1$ 이다. 소금물의 농도를 변화시켜 가면서 실험한 결과인 그림 8에서와 같이 식(2)에서의 전단파 속도의 증가는 공진주파수와 비례하게 나타난다. 즉, 소금물의 농도가 증가하여 전단파 속도가 증가하게 되면 시료 내 강성이 증가되고 이는 시료의 공진주파수의 증가로 이어지게 되는 것이다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 지반의 고결화 발생시 강성 거동특성을 평가하고자 인위적으로 글라스비즈와 소금물의 농도를 각각 0.0M, 0.1M, 0.5M, 1.0M, 2.0M 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 전단파 및 압축파의 속도 평가를 위해 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트를 사용하였다. 포화도에 따른 전단파 속도 및 압축파의 속도는 세단계로 나타났다. 전단파의 경우 첫 번째 단계는 함수비의 감소로 속도가 증가하는 구간이고, 두 번째 단계는 함수비가 감소해도 속도는 일정한 구간이며, 마지막 단계는 입자간의 소금의 고결화로 속도가 급격히 증가하는 구간이다. 압축파의 경우 첫 번째 단계는 유체를 통과하므로 가장 빠르게 나타나고 함수비가 감소하면서 급격히 감소하는 구간이며, 두 번째 단계와 마지막 단계는 전단파의 속도변화와 동일하다. 소금물의 농도가 0.0~2.0M까지 증가하는 동안 전단파의 속도는 5배, 압축파의 속도는 3.5배 증가하였다. 이는 혼합시료 내 입자간의 모세관력과 고결화에 대한 영향으로 분석된다. 또한 전단파의 공진주파수는 전단파의 속도변화 양상과 유사한 결과를 보였다.

감사의 글

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 ‘2단계 BK21사업’의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Asghari, E., Toll, D.G. and Haeri, S.M. (2003), “Triaxial behaviour of a cemented gravely sand, Tehran alluvium”, *Geotech. Geological Engrg.*, Vol.21, pp. 1-28.
- Carmichael (1982), *Handbook of physical properties of rocks*, CRC Press, Boca Raton, pp. 345.
- Christopher, B.R., Atmatzidis, D.K. and Krizek, R.J. (1989), “Laboratory testing of chemically grouted sand”, *Geotech. Testing J., ASTM*, Vol.12, No.2, pp. 109-118.
- Guéguen, Y. and Palciauskas V.(1994), *Introduction to the Physics of rocks*, Princeton University Press, Princeton, pp. 294.
- Ismail, M.A., Joer, H.A., Sim, W.H., and Randolph. M.F. (2002a), “Effect of cement type on shear behavior of cemented calcareous soil”, *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.128, No.6, pp. 520-529.
- Ismail, M.A., Joer, H.A., and Randolph, M.F. (2002b), “Cementation of porous materials using calcite”, *Geotechnique*, Vol.52, No.5, pp. 313-324.
- Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005), “Bender elements: performance and signal interpretation” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(9), pp. 1063-1070.
- Mikheev, V. V. and Petrukhin, V. P. (1973). “Construction Under Special Soil Condition” *Translated from Osnovaniya, Fundamenty Mekhanika Gruntov*, No. 1, pp. 17-20, 1973.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, John Wiley and Sons. New York, pp. 488.
- Weast, R. C. (1988), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, First Student Edition, CRC Press, Boca Raton.
- Yun, T. S. and Santamarina, J. C. (2005). “Decementation, softening, and collapse: changes in small-strain shear stiffness in k_o loading.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(9), pp. 350-358.