

용해된 소금의 고결화에 따른 탄성과 특성

Elastic Wave Characteristics According to Cementation of Dissolved Salt

엄 용 훈¹ Eom, Yong-Hun

쥡 팡 흥² Truong, Q. Hung

변 용 훈³ Byun, Yong-Hoon

이 종 섭⁴ Lee, Jong-Sub

Abstract

Salt, one of the most common soluble materials in engineering soil, may have an effect on mechanical behaviors of soils under its cementation process. In order to investigate this natural phenomenon, non-soluble material by using glass beads is mixed with salt electrolyte and cemented by using oven to evaporate water. Three different sizes of glass bead particles, 0.26, 0.5, and 1.29 mm, with different salt concentration, 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, and 2.0M, are explored by using P- and S-waves, excited by bender elements and piezo disk elements, respectively. The velocities of the P-wave and S-wave of the particulate medium cemented by salt show three stages with the degree of saturation: 1) S-wave velocities increase while P-wave velocities reduce with degree of saturation changing from 100% to 90%; 2) Both velocities are stable with degree of saturation varying from 90% to 10%; 3) The velocities change enormously when the specimens are nearly dry with degree of saturation from 10% to 0%. Besides, the resonance frequencies of S-wave show similar stages to the S-wave velocities. This study demonstrates meaningful trends of elastic wave characteristics of geo-materials according to the cementation of dissolved salt.

요 지

공학적 관점에서 용해가능한 가장 흔한 재료인 소금은 고결화 작용에 있어서 역학적 거동에 큰 영향을 미친다. 이러한 자연적 현상을 조사하기 위하여 용해되지 않는 재료인 글라스비즈와 소금물을 혼합하여 시료를 조성한 후 오븐을 이용하여 포화도를 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 입자크기가 0.26, 0.50, 1.29mm인 3종류의 글라스비즈와 0.0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0M의 소금물에 대하여 각각의 시료를 조성 후 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트를 이용하여 전단파와 압축파를 측정하였다. 소금에 의한 고결화 발생에서 전단파와 압축파 속도 모두 포화도에 따른 세가지 단계를 보여주었다: 1) 포화도가 100%~90%인 구간으로 전단파의 속도는 증가하고 압축파의 속도는 감소한다; 2) 포화도가 90%~10%인 구간으로 전단파와 압축파의 속도에 큰 변화가 없다; 3) 포화도가 10%~0%인 구간으로 전단파 및 압축파는 큰 변화를 보인다. 또한, 전단파의 공진주파수는 전단파의 속도 변화양상과 비슷한 경향을 보였다. 본 연구는 용해된 소금의 고결화에 따른 지반재료들의 탄성과 특성의 의미있는 경향을 보여준다.

Keywords : Cementation, Compression wave, Resonant frequency, Share wave, Stiffness

1 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

2 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

3 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ., jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반의 구조적 형태는 기후적, 지질학적 그리고 환경적 영향을 받는다. 열대기후 혹은 아열대 기후지역에서 종종 고층건물보다도 높은 흙 지반으로 된 기둥이나 절벽들을 발견할 수 있다. 예를 들면 미국의 모뉴먼트 벨리가 그것이다. 이러한 지역의 기둥과 절벽의 안정성은 흙입자들간의 고결화 현상에 기인한다(Schnaid 등 2001). 또한 지반 속에는 소금, 석고, 경석고, 석회석, 백운석, 및 암염과 같은 지반내 용해가능한 재료들이 포함되어 있어(Hillel 등 2004; Bell 2007), 지반공학적인 특성변화에 영향을 줄 수 있다.

지반 소실 혼합재는 댐이나 저수지뿐만 아니라 다양한 지반공학 재료로 사용되어 오고 있다. 이는 용해시 입자간의 미소구조 변형을 야기시켜 대상지반의 강도 변화와 물의 투수성 등에 영향을 미쳐 구조물에 피해를 발생시킬 수 있다. 또한 구조물 시공시 사용되어지는 상당량의 수분이 이러한 지반 내로 스며들어 입자의 용해를 야기시킨다(Mikheev and Petrukhin 1973). 발생한 입자 용해는 지반 내에 국부 간극의 증가로 이어져 구조물의 불안정은 물론 구조물과 시공 장비들의 하중으로 인해 압밀 침하를 초래할 수 있다. Macmillan 제방, Clubbiedean 저수지 (Blyth and Freitas 1984), 그리고 St. Francis Dam (Craft 등 2006)의 붕괴가 대표적인 사례이며, 지반 소실 재료를 함유한 지반의 공학적 특성 파악을 위해 다양한 연구가 수행되고 있다(Azam 2000; Fam 등 2002; Craft 등 2005; Truong 등 2009).

과거에는 해저지반이었으나 급격한 기후 변화로 인해 강수량이 증발량에 비해 턱없이 부족한 지역들이 나타나게 되었으며, 이러한 지반은 지반내 소금과 같은 용해가능한 물질을 다량 포함하고 있다. 이들 지반의 경우 지반내 수분이 증발하면서 용해된 성분들에 의해서 고결화가 발생되어지는데, 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 주요 요인이라 할 수 있다(Asghari 등 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 염화나트

륨과 같은 염분을 포함하고 있다. 본 연구에서는 기존의 연구에서 나아가 염분 농도에 따른 고결화에 대한 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 다양한 입자 크기의 글라스비즈, 그리고 소금을 이용하여 시료의 고결화에 대해 실험을 실시하였다. 이를 통해 소금과 지반 입자간의 고결화에 따른 강성특성을 연구하고자 하였다.

본 논문에서는 글라스비즈와 소금을 이용하여 다양한 입자크기와 소금농도에 따른 혼합재를 조성하였으며, 전단파 속도와 압축파 속도를 이용하여 지반 소실 특성을 평가하고자 하였다. 전단파 및 압축파 측정을 위해 사용된 셀과 장비, 그리고 실험 과정에 대해 설명하였다. 이 후 입자크기와 소금 농도에 따른 탄성파 속도의 결과에 대하여 나열하였으며, 전단파의 공진주파수를 추가적으로 분석하여 혼합재의 고결화에 따른 강성 특성을 평가하였다. 또한 입자크기에 따라 다른 지배력에 대한 탄성파의 특성과 소금의 농도 즉, 고결화 재료 함유량에 따른 탄성파 속도의 특성에 대해 서술하였다.

2. 실험적 연구

입자의 평균입경이 다른 3종류의 글라스비즈와 5종류의 서로 다른 농도의 소금물을 이용하여 고결화에 따른 강성특성을 전단파와 압축파를 이용하여 평가하였다. 고결화는 고결정도, 상대밀도, 구속압, 고결시 상재 하중 및 입자의 특성에 영향을 받는다(Christopher 등 1989; Ismail 등 2002a; Ismail 등 2002b). 그러나 이들 선행연구와는 달리 본 연구에서는 많은 고결화 요인 중 고결제의 농도와 입자크기의 특성 이외의 영향 조건을 최대한 배제시켜 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 시료 특성, 시료 조성 그리고 실험 과정과 전단파 및 압축파 측정방법은 다음과 같다.

2.1 시료의 기본특성

본 연구에 사용된 글라스비즈는 그림 1과 같다. 평균 입경이 0.26mm, 0.50mm 그리고 1.29mm인 글라스비즈에 대한 기본 물성치와 입도곡선은 각각 표 1과 그림 2에 나타내었다. 입자의 형상에 대한 영향을 최소화하기 위해 글라스비즈를 사용하였으며 이들 입자의 원형률과 구형도는 거의 1의 값을 나타낸다. 사용된 입자의 크기에 대한 영향을 조사하기 위해 세가지 시료들의 곡률계수와 균등계수가 거의 0.8~1.5의 값을 나타내는

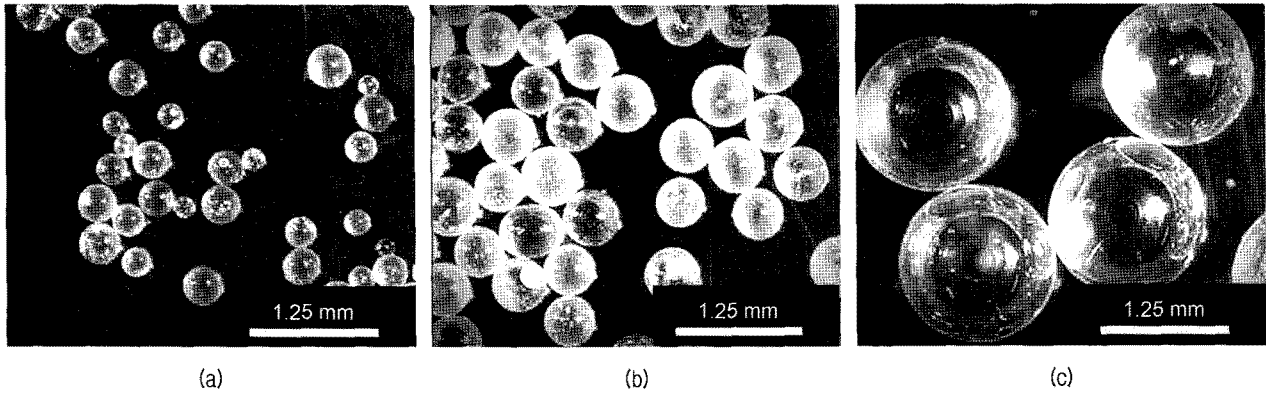


그림 1. 글라스비즈의 크기별 입자모양: (a) $D_{50}=0.26\text{mm}$; (b) $D_{50}=0.50\text{mm}$; (c) $D_{50}=1.29\text{mm}$

표 1. 글라스비즈의 기본 물성치

Category	$D_{50} = 0.26\text{mm}$	$D_{50} = 0.50\text{mm}$	$D_{50} = 1.29\text{mm}$
Effective Size (D_{10} , mm)	0.17	0.45	0.91
Average Size (D_{50} , mm)	0.26	0.50	1.29
Roundness	1		
Sphericity	1		
Uniformity coefficient (C_u)	1.70	1.16	1.45
Coefficient of gradation (C_g)	1.07	0.94	0.83
Specific Gravity (N/mm^2)	2.52		
Hardness (kgf/mm^2)	425		
Abrasion	3.14		
Compressive Strength (N/mm^2)	16.64		
Refraction Index	1.5~1.64		
Thermal Conductivity ($\text{Kcal}/\text{m}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$)	0.65		

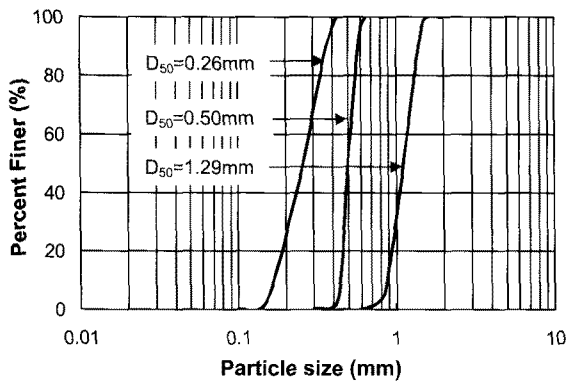


그림 2. 글라스비즈의 입도 분포도

입자의 크기가 균등한 시료를 사용하였다. 사용된 글라스비즈의 성분은 이산화규소(SiO_2), 산화칼슘(CaO), 산화나트륨이 90% 이상을 차지하며 70%가 넘는 이산화

규소를 함유한 실리카질 글라스비즈로써 비중은 2.52이다. 사용된 소금은 염화나트륨 함유율이 90% 이상인 것을 사용하였고, 비중은 2.16이다.

2.2 시료조성

평균입경 0.26mm, 0.50mm, 1.29mm인 3종류의 글라스비즈를 농도 0.0M, 0.1M, 0.5M, 1.0M, 2.0M인 소금물에 수증강사시켜 시료를 조성하였다. 조성된 글라스비즈 시료를 건조기에 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 시료는 수증에서 퇴적된 자연상태 흙의 구조를 가장 잘 모사할 수 있는 시료조성 방법인(Chaney 등 1978; Vaid and Negussey 1984) 수증강사법을 사용하여 시료가 100% 포화되도록 하였다. 수증강사법은 고결화에 영향을 미치는 상대밀도에 대한 영향을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 시료 조성시 변화할 수 있는 상대밀도의 영향을 최소화시키기 위해 사용된 시료의 무게에 대한 부피도 일정하게 고정함으로써 상대밀도에 대한 조건도 동일하게 조정하였다. 또한 수증강사법은 퇴적 과정에서 재료분리를 일으킬 수도 있으나 본 실험에서는 입자크기가 균등한 재료만을 사용함으로써 이 문제도 최소화시키고자 하였다. 사용된 셀은 그림 3(a)와 같이 정사각형으로 내부 가로, 세로 길이 모두 74mm이며, 전체 높이는 55mm이고 내부 높이는 45mm로써 바닥면의 두께는 10mm로 구성되어져 있다. 재질은 투명 아크릴을 사용하였다.

2.3 실험과정

각각의 소금물 농도에 따른 시료가 준비된 아크릴 셀을 건조기에서 시료를 건조시키면서 전체 셀의 무게 변화를 측정하여 포화도 변화를 평가하였다. 또한 포화도가 변화하면서 시료가 건조되므로 여러가지 포화도에서 시료의 전단파와 압축파를 측정하여 시료고결화에 따른 강성특성을 조사하였다. 최초 시료 조성시 상대밀도와 수위를 동일하게 유지하였으며 시료 내 소금물이 완전히 건조되어 더 이상의 무게 변화가 발생하지 않는 시점까지 실험을 수행하였다. 건조기의 온도는 70°C를 유지하였으며 무게측정 시에는 외부충격에 의한 입자의 재배열과 간극비의 변화가 없도록 하였다. 또한 실험은 혼합시료의 고결화 과정에 따른 전해질 용액의 변화를 최소화시키기 위해 외부 온도를 25°C와 습도를 50% 이하로 일정하게 유지하였다. 조성된 시료의 자유구속하중 하에서 고결화에 따른 탄성파의 특성평가를 전단파와 압축파를 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. 벤더 엘리먼트는 캔틸레버 보의 형태로 5mm를 돌출시켜 설치하였다. 이는 벤더 엘리먼트와 시료입자간의 접촉면적을 증가시킴으로써 풍부한 에너지를 발현을 위함이다. 벤더 엘리먼트의 진동이 아크릴셀을 통해 전달되지 않도록 임피던스 차이가 큰 나일론 재질의 스크류와 테프론 테잎을 이용하여 벤더 엘리먼트의 진동으로 인한 잡

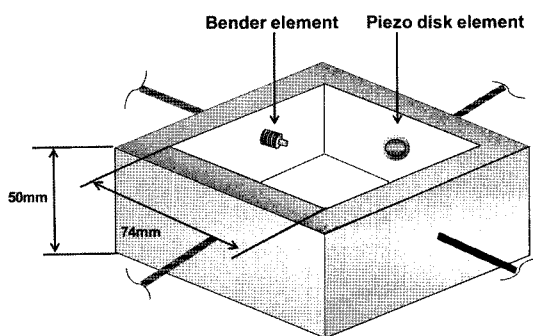
음을 최소화시켰다. 발신 및 수신 벤더 엘리먼트 사이의 누화현상을 방지하기 위하여 전도성 페인트를 이용하여 전기적 간섭현상을 차폐시켰다. 전단파는 그림 3(b)와 같이 신호발생기(Agilent 33220A)를 사용하여 20Hz의 사각파의 전기 신호를 발신 벤더 엘리먼트에 전달하게 된다. 발신 벤더 엘리먼트에 전달된 전기적 신호는 물리적 신호로 바뀌어 시료를 통과하여 수신 벤더 엘리먼트를 통해 다시 전기적 신호로 획득된다. 전달된 신호의 증폭 및 잡음 제거를 위하여 필터(Krohn-Hite 3364)를 이용하였다. 필터링 과정을 거친 신호는 오실로스코프를 통해 저장하였다. 이때 신호의 불필요한 잡음 제거와 선명한 신호를 획득하기 위해 1024개의 신호를 평균하여 저장하였다. 탄성파(압축파 속도 V_p , 전단파 속도 V_s)의 속도는 획득된 신호를 이용하여 식 (1)과 같이 계산하였다.

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

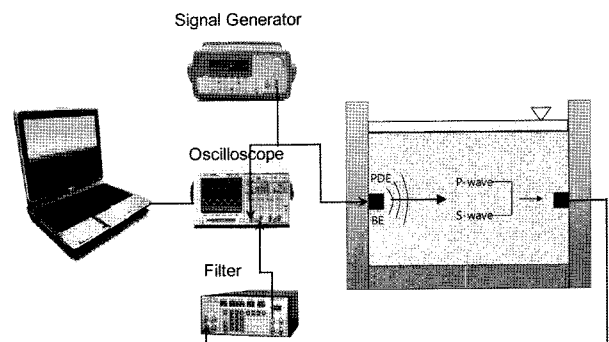
여기서, $L_{P \text{ or } S}$ 는 벤더 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트간의 끝단거리를 말하며, $t_{P \text{ or } S}$ 는 전단파 및 압축파의 이동시간을 의미한다.

2.5 압축파 측정

압축파 측정을 위하여 피에조 디스크 엘리먼트를 이용하였다. 피에조 디스크 엘리먼트는 그림 3(a)에 설치된 모습과 같쪽 면에 압전 세라믹 소자가 덮여있다. 압전 세라믹이 원형의 금속판의 한소자의 직경은 11mm, 금속판의 직경은 15mm, 그리고 두께는 0.45mm이다. 피에조 디스크 엘리먼트는 그림 3(a)와 같이 셀의 양쪽 벽



(a)



(b)

그림 3. 실험장비 모식도: (a) 벤더 엘리먼트(BE) 및 피에조 디스크 엘리먼트(PDE)가 설치된 셀; (b) 전단파 및 압축파 측정을 위한 주변 장비

면에 설치하였다. 측정 장비 구성은 그림 3(b)와 같이 전단파 측정 장비와 동일하다. 피에조 디스크 엘리먼트에서 발생한 신호는 전단파와 동일한 과정을 거쳐 신호를 획득하게 된다. 압축파 역시 아크릴 셀을 통한 직접파의 전달을 피하기 위하여 셀과 임피던스가 차이가 큰 재료인 실리콘을 사용하여 고정하였다. 압축파 속도(V_p)의 계산은 식 (1)에 언급되었다.

3. 실험결과

소금물 농도와 입자크기를 달리한 시료에서 고결화가 발생하는 과정에서 변화하는 포화도에 따른 전단파와 압축파의 변화과정을 측정하였다.

3.1 전단파 신호

소금물과 글라스비즈의 혼합시료에 대해 완전히 포화된 시점부터 완전 건조상태에 이를 때까지 전단파 신호를 측정하였다. 소금물의 농도는 0.0M, 0.1M, 0.5M, 1.0M, 2.0M이며 각각의 시료에 대하여 포화도의 변화량에 따른 전단파 속도를 평균입경이 가장 작은

0.26mm인 시료의 결과를 그림 4에 평균입경이 가장 큰 1.29mm인 시료의 결과를 그림 5에 나타내었다. 전단파 신호의 양상은 크게 세단계로 구분되어진다. 첫번째 단계는 시료의 포화도가 100%에서 가장 낮은 유효 응력으로 인하여 가장 느린 초기도달 시간을 나타낸다. 이후 포화도가 약 90%까지 급격히 초기도달시간이 감소한다.

두 번째 단계는 포화도가 약 90%에서 약 10%까지 변화할 때 나타나는데 포화도의 변화에 비해 초기도달시간은 소폭 감소하는 안정화 단계이다. 마지막 세 번째 단계는 포화도가 약 10%에서 완전건조되는 시점인 0% 구간에서 나타난다. 평균입경이 0.26mm인 시료에서 전단파의 신호는 그림 4와 같이 포화도의 감소량에 비해 초기도달시간이 급격히 감소한다. 이는 소금물의 농도가 증가할수록 초기도달시간이 더욱 급격히 감소하며, 더 높은 포화도에서 감소가 시작된다. 한편 평균입경이 1.29mm인 시료의 경우, 세번째 단계에서 그림 5와 같이 소금물의 농도가 0.0M인 경우 초기도달시간이 다시 증가하는 양상이 나타난다. 이는 평균입경이 0.50mm인 경우에서도 동일한 결과를 보였다.

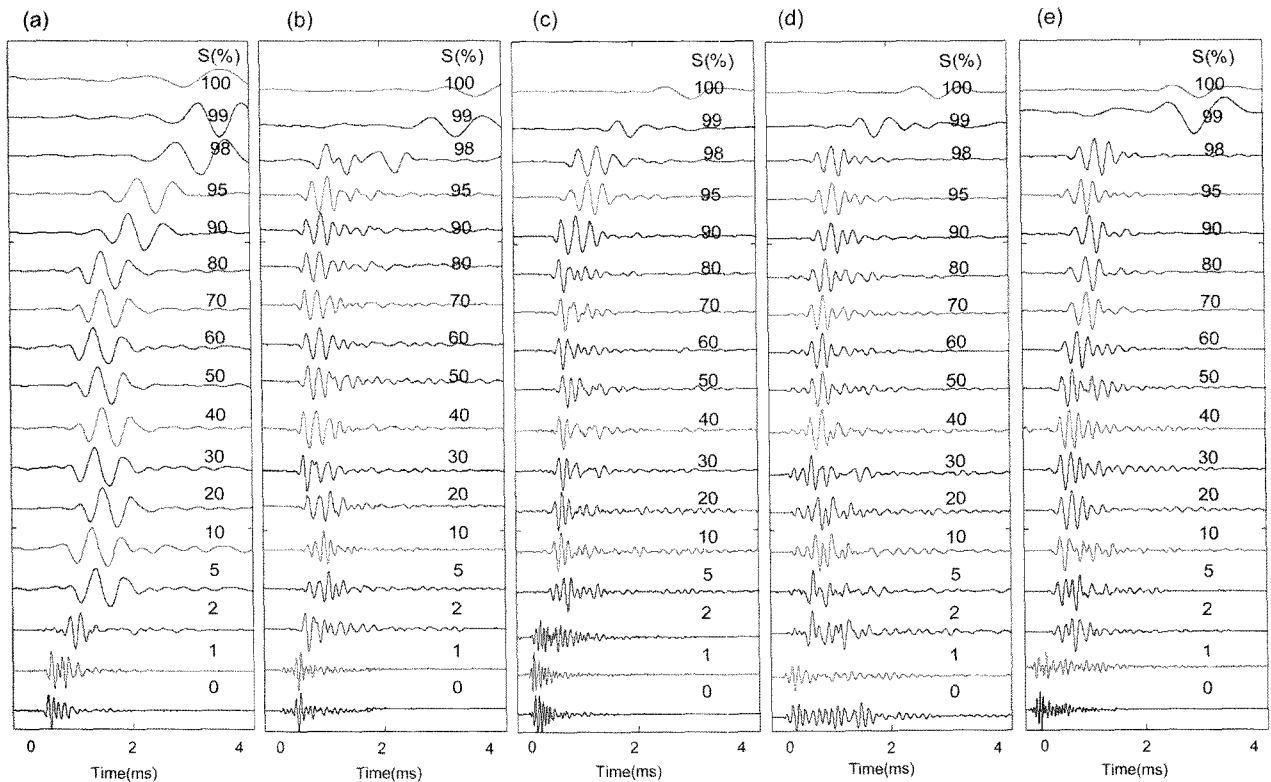


그림 4. $D_{50}=0.26\text{mm}$ 의 포화도에 따른 전단파 신호변화: (a) NaCl 0.0M: (b) NaCl 0.1M: (c) NaCl 0.50M (d) NaCl 1.0M: (e) NaCl 2.0M. S(%)는 포화도를 의미함

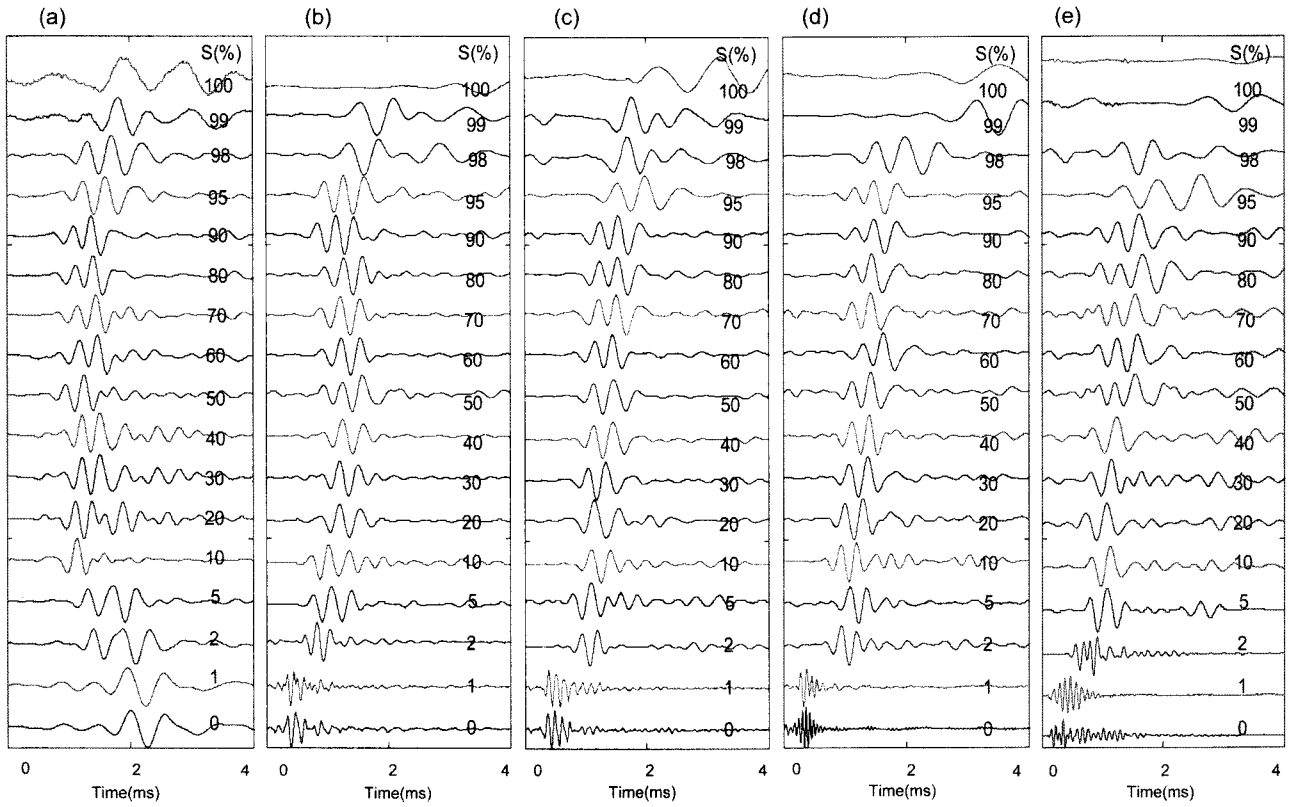


그림 5. $D_{50}=1.29\text{mm}$ 의 포화도에 따른 전단파 신호변화: (a) NaCl 0.0M; (b) NaCl 0.1M; (c) NaCl 0.50M (d) NaCl 1.0M; (e) NaCl 2.0M. S(%)는 포화도를 의미함.

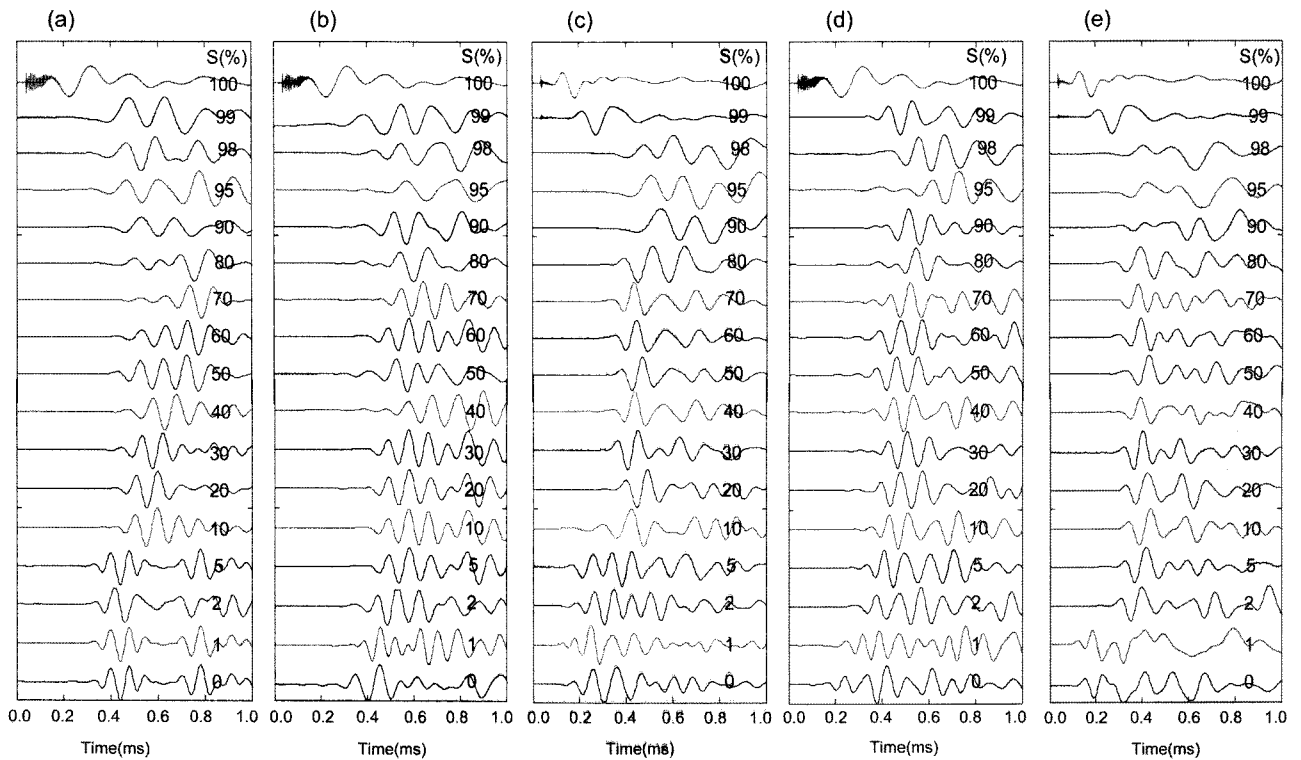


그림 6. $D_{50}=0.26\text{mm}$ 의 포화도에 따른 압축파 신호변화: (a) NaCl 0.0M; (b) NaCl 0.1M; (c) NaCl 0.5M (d) NaCl 1.0M; (e) NaCl 2.0M. S(%)는 포화도를 의미함

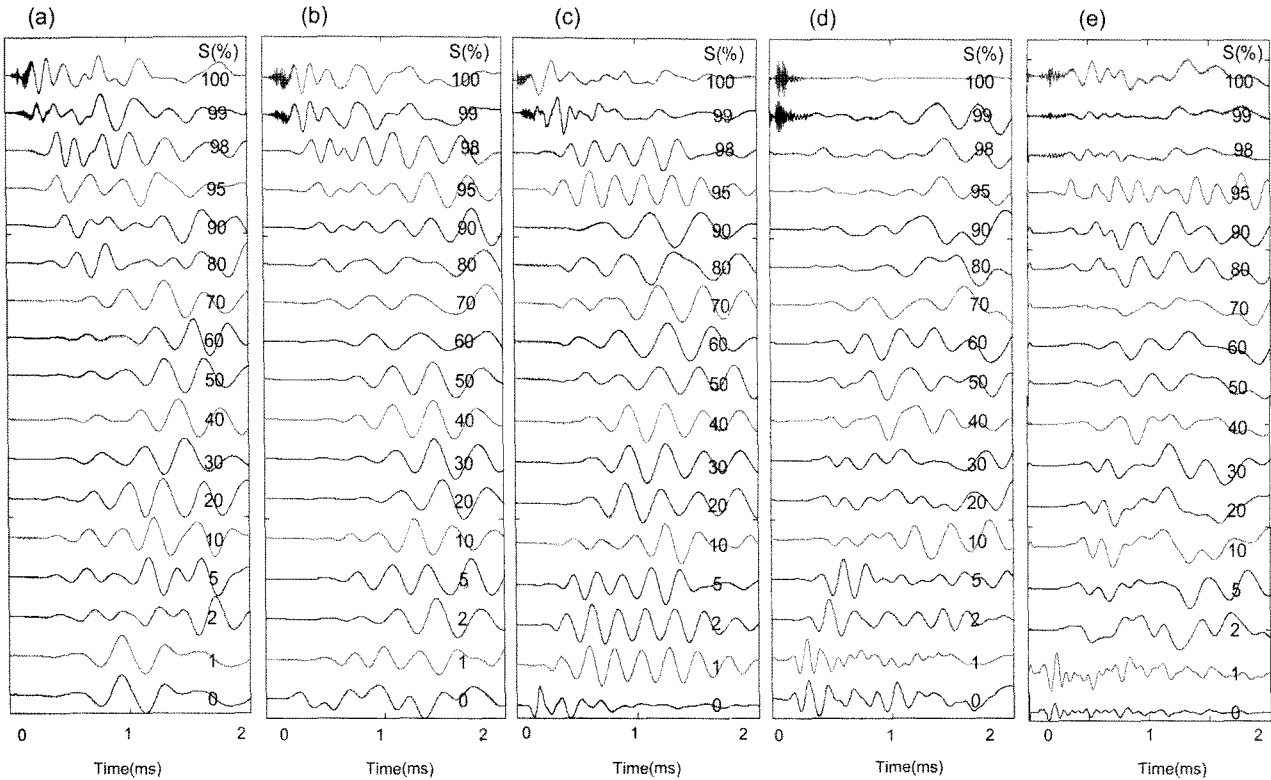


그림 7. $D_{50}=1.29\text{mm}$ 의 포화도에 따른 압축파 신호변화: (a) NaCl 0.0M; (b) NaCl 0.1M; (c) NaCl 0.5M (d) NaCl 1.0M; (e) NaCl 2.0M. S(%)는 포화도를 의미함.

3.2 압축파 신호

평균입경이 0.26mm와 1.29mm인 시료의 압축파 신호 양상을 그림 6, 7에 각각 나타내었다. 압축파 신호 양상도 전단파 신호와 유사하게 세단계로 구분되어진다. 첫 번째 단계는 100% 포화시 유체에서 가장 빠른 속도를 보이는 압축파의 초기도달시간이 가장 빠르게 도착한 것을 볼 수 있으며 포화도가 점차 감소하여 약 90%에 이를 때까지 초기도달시점은 급속하게 증가한다. 두 번째 단계는 포화도가 약 90%에서 10%가 되는 시점에서 나타나는데 이 구간에서는 포화도의 변화량에 비해 초기도달시간은 소폭의 감소만 발생하는 안정화 단계이다. 마지막 세 번째 단계는 포화도가 약 10%에서 완전 건조시점인 0%에 이르는 시점이다. 이때 평균입경이 0.26mm인 시료의 압축파 신호(그림 6)는 전단파와 마찬가지로 급격한 초기도달시간의 감소를 보이며, 소금농도가 증가할수록 초기도달시간도 비례하여 증가하는 양상을 보인다. 그러나 평균입경이 1.29mm인 시료의 소금물의 농도가 0.0M인 시료의 경우에는 전단파의 신호양상의 특징과 동일하게 마지막 세 번째 단계인 포화도가 약 10%에서 0%로 갈수록 초기도달시간이 다시 증

가하는 것을 볼 수 있다. 이는 평균입경이 0.50mm인 경우 또한 동일한 양상을 보였다.

3.3 전단파 속도

그림 4, 5의 전단파 신호에서 초동을 취하고 식 (1)을 이용하여 전단파 속도를 산정하여 모든 시료에 대하여 포화도에 따른 변화를 그림 8에 나타내었다. 전단파 속도는 포화도에 따라 세단계의 변화가 있음을 보여준다. 첫 번째 단계는 수증강사법에 의해 조성된 시료가 완전히 포화를 이룬 상태에서 포화도가 약 90%로 감소되는 범위에서 발생한다. 전단파 속도는 포화도가 100%일 때 소금물의 농도와는 무관하게 20~25m/s로 거의 동일하다. 이후 시료가 완전 포화단계를 거쳐 불포화단계로 접어들면서 속도는 급격히 증가하게 되는데 이때의 속도는 소금물의 농도에 관계없이 모든 농도에서 거의 동일한 변화를 보인다. 포화도 90%에서 전단파의 속도는 약 70m/s로 나타났다. 즉, 포화도가 100%에서 90%로 감소하면서 전단파 속도는 약 3배가 증가되었다.

두 번째 단계는 안정화 단계로 포화도가 90%~10% 구간이 불포화도 거동을 보이는 구간이다. 이 단계에서

는 시료 내 입자와 입자사이의 간극에 존재하는 수분의 증발로 인해 발생되어지며 이때 소폭의 모세관력의 증가로 유효응력이 증가되어 전단파의 속도가 증가된다. 이 단계에서 전단파의 속도는 약 110m/s까지 증가한다.

마지막 단계는 포화도가 약 10%에서 0%인 완전 건조 상태에 이를 때까지의 범위에서 나타난다. 이 단계에서 전단파의 속도가 가장 많은 변화를 일으키게 된다. 평균입경이 0.26mm인 경우 마지막 단계에서는 두 번째 단계에서 완만히 나타났던 모세관력이 급격히 증가함에 따라 전단파의 속도도 급격한 증가로 이어지게 된다. 그러나 입자가 큰 0.50mm와 1.29mm인 경우 소금물의

농도가 0.0M에서 속도의 감소가 나타난다. 소금물의 농도가 0.1M 이상인 경우는 모두 세번째 단계에서 입자의 크기와 상관없이 소금의 입자가 입자의 접촉면 또는 접촉면과 입자사이의 간극에서 고결화가 발생됨에 따라 전단파 속도가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 세번째 단계의 전단파 속도는 소금물의 농도가 0.1M에서 2.0M로 증가하는 동안 평균입경이 0.26mm인 시료에서 약 4.5배 증가하였고, 평균입경이 1.29mm인 시료는 약 3.5배가 증가하였다.

3.4 압축파 속도

압축파의 속도 산정은 전단파와 동일하게 식 (1)을 사용하였다. 그림 6, 7에서 얻어진 초기 도달 시간을 이용하여 포화도에 따른 압축파 속도의 변화 양상을 그림 9에 나타내었다. 압축파의 속도변화 역시 전단파와 유사하게 세가지 단계로 구분된다. 완전 포화된 시료에서 측정된 압축파의 속도는 고주파수의 속도로서 약 1900m/s로 측정되었으며 이는 유체의 압축파 속도는 1500m/s ~ 2000m/s의 범위에 있는 값이다(Carmichael 1982; Weast 1988; Guéguen and Palciauskas 1994). 이후 포화도가 약 90%까지 압축파의 속도는 약 300m/s까지 급격한 감소를 보인다. 즉, 압축파는 시료의 완전포화를 나타내는 지시계임을 보여준다. 포화도가 100%에서 90%로 감소하면서 압축파 속도는 약 6배 감소하였다.

두 번째 단계는 전단파와 마찬가지로 간극의 크기에 영향을 받아 소폭의 속도 증가를 보인다. 압축파의 속도는 포화도가 90%에서 10%로 감소할 때 약 1.5배가 변화하였다. 마지막 세 번째 단계인 포화도가 약 10%에서 완전 건조시점인 0%에서는 급격한 압축파 속도의 증가를 보였다. 또한 입자의 크기가 감소할수록 그리고 소금의 농도가 증가할수록 압축파 속도에서 큰 증가량을 보였다. 또한 전단파의 속도 양상과 마찬가지로 소금의 농도가 0.0M인 경우에서는 평균입경이 0.26mm일때 속도가 증가하나, 평균입경이 0.50mm, 1.29mm인 경우 세번째 단계에서 속도가 감소하는 양상이 나타났다. 세번째 단계에서 압축파 속도는 소금물의 농도가 0.1M에서 2.0M까지 변하는 동안 평균입경이 0.26mm인 시료에서는 약 3.4배 증가하였고, 평균입경이 1.29mm인 시료는 약 2.8배가 증가하였다.

전단파와 압축파 속도 모두 소금물의 농도가 증가할수록 속도의 변화량도 크게 나타난다. 또한 소금물의 농

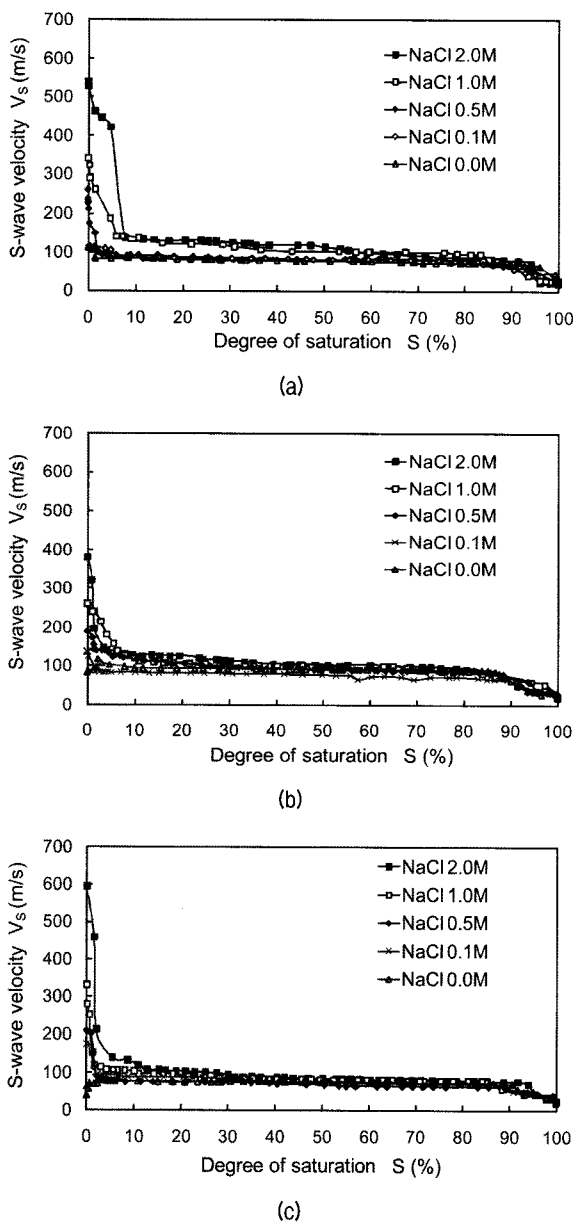
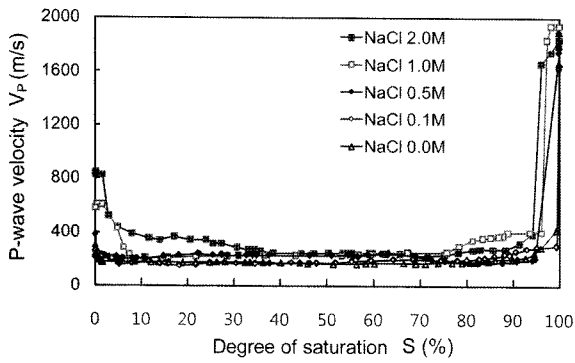
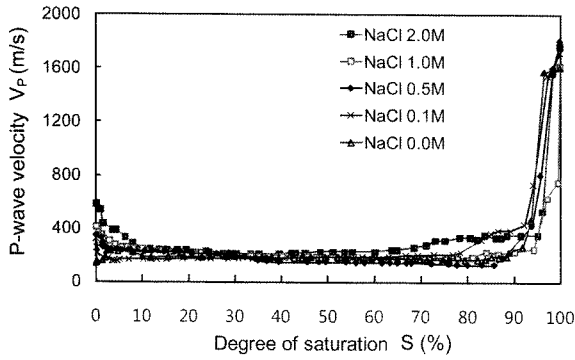


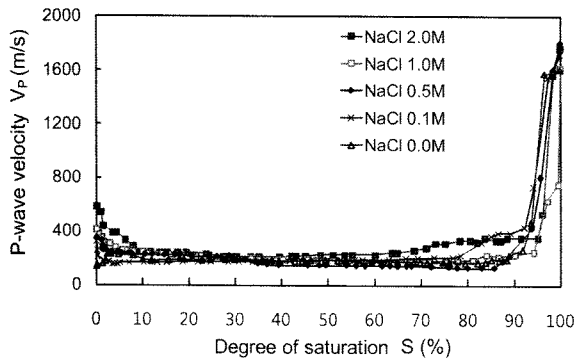
그림 8. 포화도와 초기 소금농도에 따른 전단파 속도: (a) $D_{50}=0.26\text{mm}$; (b) $D_{50}=0.50\text{mm}$; (c) $D_{50}=1.29\text{mm}$



(a)



(b)



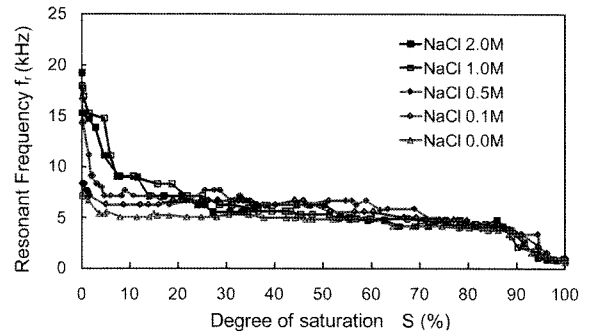
(c)

그림 9. 포화도와 초기 소금농도에 따른 압축파 속도: (a) $D_{50}=0.26\text{mm}$; (b) $D_{50}=0.50\text{mm}$; (c) $D_{50}=1.29\text{mm}$

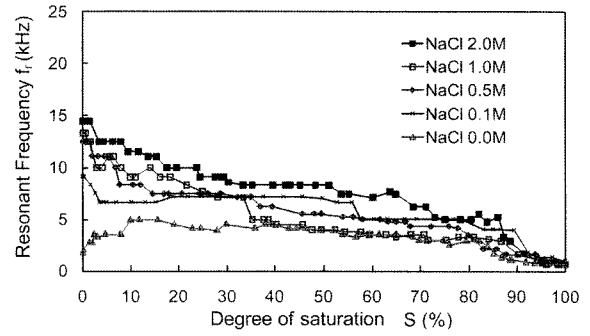
도가 증가할수록 세번째 단계로 이동하는 단계의 포화도가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 소금물의 농도가 높을수록 포화도가 높은 시점에서 입자간 고결화가 시작됨을 의미한다.

3.5 포화도에 따른 전단파의 공진주파수

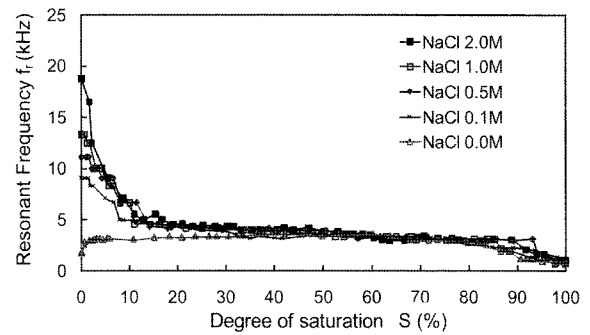
포화도와 소금물의 농도에 따른 전단파의 공진주파수의 변화를 입자의 크기별로 그림 10에 나타내었다. 공진주파수의 변화양상 역시 전단파의 속도 변화양상과 유사하게 세단계로 구분되어진다. 탄성파의 속도와 유



(a)



(b)



(c)

그림 10. 포화도와 초기 소금농도에 따른 전단파 속도의 공진주파수: (a) $D_{50}=0.26\text{mm}$; (b) $D_{50}=0.50\text{mm}$; (c) $D_{50}=1.29\text{mm}$.

사하게 전단파의 공진주파수에서도 평균입경이 0.50, 1.29mm인 경우 소금물의 농도가 0M인 경우, 포화도가 0에 가까워지면서 감소하는 양상을 보인다. 소금물의 농도가 증가하여 전단파 속도가 증가하게 되면 시료 내 강성이 증가되고 이는 시료의 공진주파수의 증가로 이어지게 된다.

한편, 평균입경이 0.26mm와 1.29mm인 시료에서 측정된 전단파의 공진주파수는 전단파의 속도양상과 거의 유사하지만 평균입경이 0.50mm인 시료의 공진주파수는 큰 분산을 보인다. 전단파 측정시 사용된 벤더 엘리먼트의 공진주파수는 근접장의 크기, 전단파의 초기 도달시간, 해상도, 그리고 표피심도(skin depth)에 영향

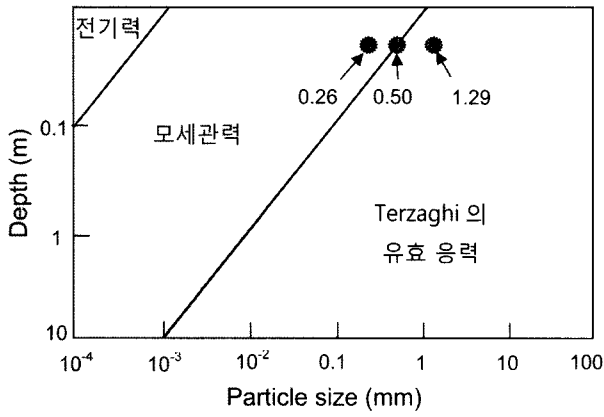


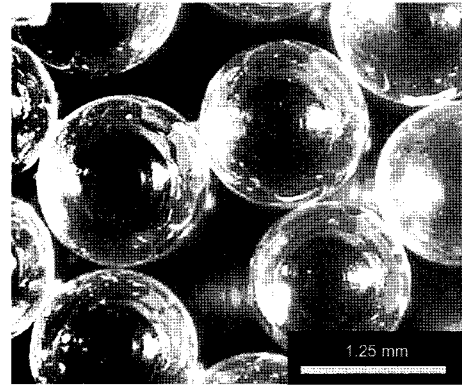
그림 11. 깊이에 따른 입자 크기의 지배력(Santamarina 등 2001)

을 미친다(Lee and Santamarina 2005). 따라서 공진주파수의 결정은 벤더 엘리먼트의 설계 상수에 있어서 중요한 요인이다.

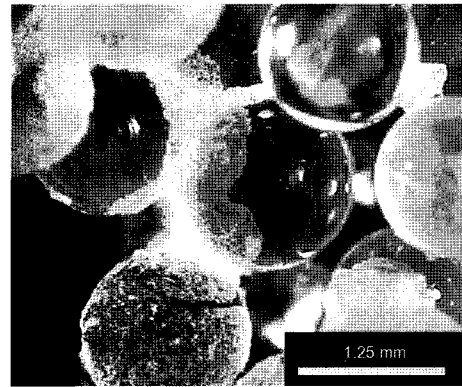
4. 토의 및 분석

4.1 입자크기에 따른 탄성과 속도

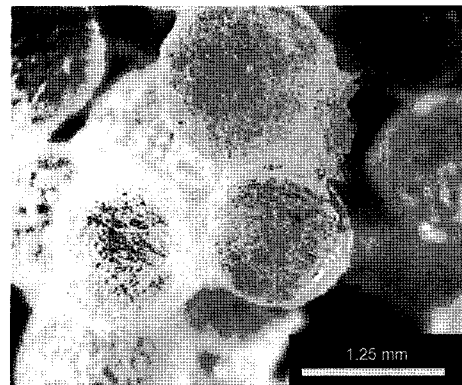
입자크기와 깊이에 따른 지배력에 대한 범위를 그림 11에 나타내었다. 진단파를 측정할 셀의 깊이가 0.025m 이므로 입자크기와 깊이 관계를 그림 11위에 함께 표시하였다. 평균입경이 0.26mm인 시료의 경우 모세관력에 의해 지배받으며, 평균입경이 0.50mm인 경우 모세관력과 유효응력의 영향력의 경계면에 걸쳐 있으며, 평균입경이 1.29mm인 경우 유효응력에 의해 영향을 받는 것을 알 수 있다. 따라서 진단파 속도와 압축파 속도의 변화 양상에서도 볼 수 있듯이, 소금물의 농도가 0.0M에서 평균입경이 0.26mm인 시료의 경우 모세관력에 영향을 받으므로, 포화도가 감소할수록 입자간의 유효응력이 증가한다 (0% 포화도인 경우도 공기중에서 미량의 수분을 흡수함으로 유효응력이 증가). 또한 건조 과정동안 발생하는 입자들의 움직임에 따른 접촉수의 증가와 잔류압축응력의 효과로 유효응력의 함수인 진단파와 압축파의 속도 또한 증가하게 된다(조계춘과 이인모 2002). 그러나 평균입경이 0.50mm와 1.29mm인 시료의 경우 소금물의 농도가 0.0M인 시료에서 포화도가 0에 가까워지면서 모세관력이 소멸되면서 유효응력이 감소되어 탄성과 속도의 감소로 이어진다. 이와 같은 현상은 그림 10에 표시된 공진주파수에서도 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 12. $D_{50}=1.29\text{mm}$ 시료의 고결화 후 현미경 사진: (a) NaCl 0.0M; (b) NaCl 1.0M; (c) NaCl 2.0M.

4.2 소금농도에 따른 탄성과 속도

소금물의 농도에 따른 입자간 고결화에 대한 현미경 사진을 그림 12에 나타내었다. 그림 12(a)~(c)는 평균 입경 1.29mm인 시료에서 소금물의 농도가 0.0M, 1.0M, 2.0M인 경우 고결화 이후 시료의 상부에서 획득된 고결 입자의 현미경 사진이다. 본 연구에 사용된 고결화 재료인 소금의 함유량이 낮은 경우 고결화 현상이 입자표면과 입자와 입자의 접촉부위에서 발생한다. 그러나 고결

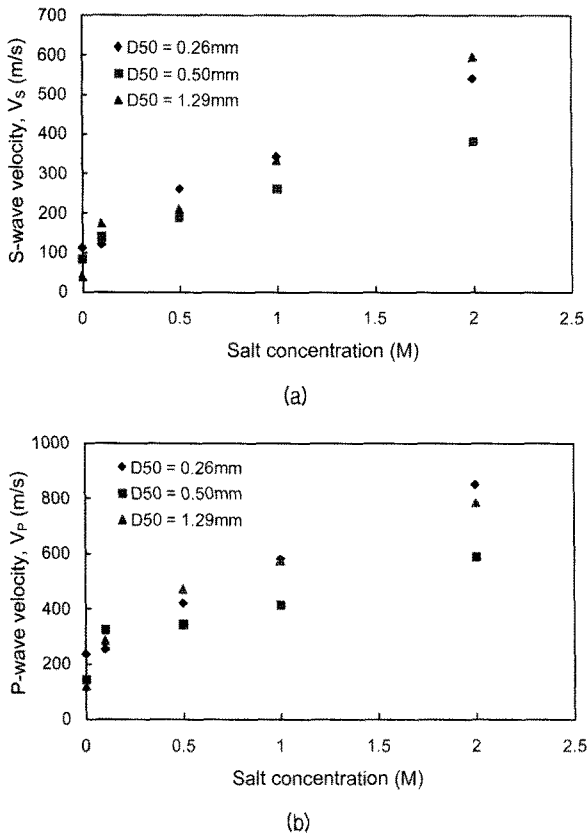


그림 13. 완전 건조된 시료의 소금 농도에 따른 입자 크기별 탄성파 속도: (a) 전단파 속도; (b) 압축파 속도

화 재료의 함유량이 많은 경우 고결화 현상이 입자표면, 입자와 입자사이의 접촉부위뿐만 아니라 입자사이의 간극에서도 발생(그림 12(c))하게 되어 입자와 입자의 거동이 아닌 연속체로서 거동을 하게 된다. 이와 같이 소금물의 농도가 증가함에 따라 연속체로 거동하므로 0.1M 이상인 모든 시료에서는 소금물의 농도가 증가할수록 전단파 및 압축파 속도가 모두 증가하는 경향을 보인다.

고결화 재료는 유효 응력의 증가 없이도 포화도의 변화에 따라 입자의 접촉점 주변의 면적을 증가시켜 미소 변형률 강성을 상당히 증가시킨다(이창호 등2008). 또한 가벼운 시멘트 결합은 강도 변화에 상대적으로 작게 영향을 끼치지만 미소변형률 전단강성을 크게 증가시키며 100배 이상의 증가도 관찰되었다(조계춘과 이인모 2002). 소금물의 농도가 0.1~2.0M까지 증가하는 동안 전단파의 속도는 약 2.7~4.5배, 압축파의 속도는 1.8~3.5배 증가하였다. 평균입경이 0.26mm와 1.29mm의 경우에는 거의 비슷한 증가양상을 보였다. 그러나 평균입경이 0.50mm의 경우 전단파 및 압축파 속도 모두 가장 작은 증가량을 보였다. 또한 평균입경이 다른 세가지 경

우 모두 소금농도가 0.1M에서 2.0M로 변화하는 동안 전단파와 압축파의 속도 모두 거의 선형적으로 증가하는 경향이 나타났다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 지반의 고결화 발생시 변화하는 지반의 강성특성을 평가하고자, 평균입경(D_{50})이 0.26, 0.50, 1.29mm인 글라스비즈를 농도가 각각 0.0, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0M인 소금물에 수증강사 시킨 후 건조시켜가며 실험을 수행하였다. 강성평가는 전단파 및 압축파를 이용하였으며, 전단파 및 압축파의 속도와 전단파의 공진주파수의 변화를 평가하기 위해 벤티 엘리먼트와 피에조 디스크 엘리먼트를 사용하였다.

실험 결과, 포화도에 따른 전단파 속도 및 압축파의 속도는 세단계로 나타났다. 첫 번째 단계는 포화도가 100%~90%인 구간으로써, 포화도가 감소함에 따라 전단파 속도가 증가하고, 압축파의 속도는 급격히 감소한다. 두 번째 단계는 포화도가 90%~10%인 구간으로써, 포화도가 감소해도 전단파와 압축파 속도는 크게 변화하지 않는 구간이며, 마지막 세번째 단계는 포화도가 10%~0%인 구간으로써, 입자와 입자사이에서 소금의 고결화 및 모세관력에 의한 유효응력에 영향을 받아 전단파와 압축파의 속도가 급격히 증가할 수도 있고, 감소할 수도 있는 구간이다. 소금물의 농도가 0.0M에서 평균입경이 가장 작은 0.26mm인 경우, 공기중에서 미량의 수증기도 모세관력에 큰 영향을 줄수 있고, 입자에 남아있는 잔류압축응력에 의해서 마지막 세번째 단계에서 전단파와 압축파의 속도가 증가한 반면, 평균입경이 0.50, 1.29mm인 두 경우, 탄성파의 속도가 급격히 감소하였다.

소금물의 농도가 0.1M 이상인 모든 시료에서는 소금물의 농도가 증가할수록 전단파 및 압축파 속도가 모두 증가하는 동일한 양상을 보였다. 소금 농도가 낮은 경우 입자사이와 표면에서 고결화가 발생되고, 소금 농도가 높아질수록 입자의 표면뿐만 아니라 입자사이의 간극도 고결화가 발생되어 연속체로 거동하게 된다. 전단파의 공진주파수는 전단파의 속도와 유사한 경향을 보였다. 소금물의 농도가 0.1~2.0M까지 증가하는 동안 평균입경이 다른 각각의 시료에서 전단파 속도는 약 2.7~4.5배, 압축파의 속도는 약 1.8~3.5배 증가하였다. 즉, 물속에 녹아있는 소금의 고결화가 발생할 경우 전단파

및 압축파의 속도가 크게 증가하였으며 이는 강성의 증가를 의미한다. 강성의 증가에 따른 강도의 증가가 기대되므로 이에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 고려대학교 산업체 대응자금(2단계 두뇌한국 21대응)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이창호, 윤형구, 이우진, 이종섭 (2008), “고결된 Engineered Soils의 탄성과 특성”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.24, No.2, pp.87-97.
2. 조계춘, 이인모 (2002), “탄성파를 이용한 흙의 특성연구”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.18, No.6, pp.83-101.
3. Asghari, E., Toll, D. G., and Haeri, S. M. (2003), “Triaxial behaviour of a cemented gravelly sand, Tehran alluvium”, *Geotech. Geological Engrg.*, Vol.21, pp.1-28.
4. Azam, S. (2000), “Collapse and compressibility behaviour of arid calcareous soil formations”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Springer Berlin, 59(3), pp.211-217.
5. Bell, F. G. (2004), *Engineering Geology - 2nd edition*. Elsevier. Great Britain.
6. Blyth, F. G. H. and de Freitas, M. H. (1984), *A Geology for Engineers*. Elsevier Butterworth. Oxford.
7. Carmichael, R.S. (1982), *Handbook of physical properties of rocks*, CRC Press, Boca Raton, p.345.
8. Chaney, R. and Mulilis, P. J. (1978), “Suggested method for soil specimen remolding by wet raining”, *Geotech. Testing J. ASTM*, Vol.1, No.2, pp.107-108.
9. 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.
10. Craft, D. (2005), “Seepage Chemistry Manual”, *Report DSO-05-03, US Department of the Interior*, Bureau of Reclamation, Dam Safety Technology Development Program, Denver, Colorado, p.76.
11. Craft, D., Cain, C. and Sullivan, C. (2006), “Seepage Geochemistry and Mineral Dissolution at Clark Canyon Dam, Pick-Sloan Missouri Basin Project, East Bench Unit, Montana,” *Technical Memorandum* 86-6829010, U.S. Department of the Interior - Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, p.48.
12. Fam, M. A., Cascante, G., and M. B. Dusseault, M. B. (2002), “Large and Small Strain Properties of Sands Subjected to Local Void Increase”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.12, pp.1018-1025.
13. Guèguen, Y. and Palciauskas V. (1994), *Introduction to the Physics of rocks*, Princeton University Press, Princeton, p.294.
14. Hillel, D. (2004), “Encyclopedia of Soils in the Environment.” *Academic Press*, Volume 1.
15. 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.
16. 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.
17. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(9), pp.1063-1070.
18. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005), “Bender elements: performance and signal interpretation”
19. Mikheev, V. V. and Petrukhin, V. P. (1973), “Construction Under Special Soil Condition” *Translated from Osnovaniya, Fundamenty Mekhanika Gruntov*, No.1, pp.17-20.
20. 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, p.488.
21. Schnaid, F., Prietto, P. D. M., and Consoil, N. C. (2001), “Charaterization of cemented sand in triaxial compression”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.10, pp.857-868.
22. Truong, Q. H., Eom, Y. H., and Lee, J. S. (2009), “Stiffness Characteristics of Soluble Mixtures”, *Geotechnique* (Accepted).
23. Vaid, Y. P. and Nequssey, D. (1984), “Relative density of air and water pluviated sand”, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp. 101-105.
24. Weast, R. C. (1988), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, First Student Edition, CRC Press, Boca Raton.6
25. Yun, T. S. and Santamarina, J. C. (2005), “Decementation, softening, and collapse: changes in small-strain shear stiffness in ko loading”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 131(9), pp.350-358.

(접수일자 2009. 4. 16, 심사완료일 2009. 5. 26)