한국지반공학회논문집 제26권 4호 2010년 4월 pp. 37 ~ 45

소금의 고결화 현상에서 모세관 효과

Effects of Capillary Force on Salt Cementation Phenomenon

쭝 꽝 흥[1] Truong, Q. Hung
변 용 훈[2] Byun, Yong-Hoon
엄 용 훈[3] Eom, Yong-Hun
이 종 섭[4] Lee, Jong-Sub

Abstract

Salt cementation, a typical naturally-cemented phenomenon, may occur due to water evaporation under the change of climate. Capillary force may influence the distribution of cement in granular soils. This study addresses the effect of capillary force on salt cementation using five different techniques: cone penetration test, electrical conductivity measurement, photographic imaging technique, nondestructive imaging technique, and process monitoring by elastic wave. Glass beads modeling a particulate media was mixed with salt water and then dried in an oven to create the cementation condition. Experimental results show that salt cementation highly concentrates at the top of the small particle size specimens and at the middle or the bottom of the large particle specimens. The predicted capillary heights are similar to the locations of high salt concentration in the cemented specimens. Five suggested methods show that the behavior of salt-cemented granular media heavily depends on the capillary force.

요 지

기후변화로 인해 물의 증발량이 많은 지역의 지반에서는 자연적인 소금의 고결화 현상이 발생한다. 이러한 소금의 고결화 분포는 모래지반에서 모세관력에 영향을 받는다. 이 연구의 목적은 콘 관입시험, 전기전도율 측정, 사진 이미지 촬영, 비파괴 이미지 분석 그리고 탄성파에 의한 프로세스 모니터링을 이용하여 소금의 고결화 현상에 대한 모세관력의 효과를 관찰하는 것이다. 실험은 입상재료를 모형화한 글라스비즈를 소금물에 포화시킨 후, 오븐에 넣어 시료를 건조시킴으로써 고결화를 발생시켰다. 실험결과, 고결된 소금의 농도는 시료입경이 작은 경우 최상부에서 높았고, 시료입경이 큰 경우 중간 또는 하부에서 높았다. 고결된 시료에서 높은 소금농도의 위치는 해석적 방법으로 산정된 모세관 높이와 유사하였다. 본 연구에서 수행한 5가지 실험은 모세관력이 소금이 고결된 흙과 같은 입상재료의 거동에 중요한 영향을 끼치는 것을 보여준다.

Keywords : Capillary, Conductivity, Cone tip resistance, Compressional wave, Salt cementation, Shear wave, Unsaturated soil

1. 서 론

자연적인 고결화 현상은 초기간극비와 응력이력과 같은 기하학적 거동에 중요한 역할을 한다(Leroueil and Vaughan 1990). 고결화 현상은 미소변형률에서의 강성과 액상화에 대한 저항을 향상시키고, 흙의 강도를 증

1 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사후 연구원 (Postdoctoral Fellow, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)
2 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)
3 동명기술공단 터널부 사원 (Engineer, Department of Tunnel Engrg., Dongmyeong Engrg. Consultant & Architecture)
4 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.; jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

가시키며, 흙의 침하를 감소시킨다. 하지만, 고결화가 깨어지면 강도의 손실이 발생된다(Mitchell and Soga 2005). 바다에 근접한 지반에서 흔히 발견되는 소금광물은 전형적인 자연 고결화제이다. 지반에서는 탈수현상에 의해 소금 고결화뿐만 아니라, 모세관력도 동시에 발생된다. 이와 같은 이유로 모세관력은 소금의 고결화에 의한 결합 형성과 강도특성에 큰 영향을 주게 된다.

공학적인 흙의 응력-변형률 거동(Coop and Atkinson 1993; Leroueil and Vaughan 1990; Cuccovillo and Coop 1999; Ismael 2001; Fonseca et al. 1997), 원위치 재하특성(Fonseca et al. 1997; Consoli et al. 1998; Ismael 2001), 군말뚝거동(Ismael 2001), 압축성, 붕괴와 크립거동(Coop and Willson 2003)을 포함한 다양한 지반공학적 분야에서 자연적 고결화의 효과는 많은 연구자들에 의해 연구되어 오고 있다. 실내실험을 통하여, 소금의 고결작용이 지반구조물의 침하와 파괴 그리고 투수계수 등을 감소시킨다는 것이 관찰되었다(Abduljauwad and Al-Amoudi 1995). 또한, 탄성파를 이용하여 소금에 의해 고결된 입상재료의 미소변형 강성을 조사하기도 하였다(Truong et al. 2009). 그러나, 모세관력 때문에 발생하는 소금으로 고결된 입상재의 깊이에 따른 특징은 연구되지 않았다.

본 연구에서는 글라스비즈를 사용하여 입상재로부터 소금물을 증발시킴으로써, 모세관력이 소금의 고결화에 미치는 효과를 조사하였다. 먼저, 초소형 콘을 이용하여 소금으로 고결된 시료의 역학적 강도를 측정하였다. 둘째, 건조후 깊이에 따른 몇 개의 위치에서 얻은 시료를 이용하여 전기전도율을 측정함으로써, 소금농도의 분포를 조사하였다. 셋째, 일정시간마다 사진을 찍어 소금의 움직임을 파악하였다. 넷째, 깊이에 따라 탄성파를 이용하여 시료를 스캐닝하였다. 다섯째, 건조과정동안 탄성파 측정을 위한 피에조 디스크 센서 시스템을 이용하여 깊이에 따른 미소변형률에서의 강성변화를 관측하였다. 마지막으로 해석적인 방법으로 모세관 높이를 계산한 후, 실험에서 측정된 값과 비교하였다.

2. 관입 저항

용해된 소금을 건조시킴으로써 발생하는 고결된 입상체의 강도변화는 마이크로 콘 관입기를 이용하여 조사하였다.

본 연구에서는 입자형상의 영향을 최소화시키기 위해 구형도와 원형도가 1인 글라스비즈를 이용하였다. 글라스비즈는 평균입경(D_{50})이 0.26mm, 0.50mm, 1.29mm인 3종류를 사용하였다. 사용된 글라스비즈의 특성은 표 1에 정리하였다. 글라스비즈를 이루는 성분은 SiO_2, CaO, Na_2O이었고, 고결화제로서 소금을 사용하였다. 또한, 글라스비즈와 소금의 비중은 각각 2.52와 2.16로 나타났다.

시료는 직경 150mm, 높이 250mm인 원통형 셀에 조성하였다. 글라스비즈는 0.1M의 소금물에 밀도변화를 최소화하기 위해 수중강사법을 이용하여 시료를 조성하였다. 수중강사법을 이용하여 조성된 시료는 고결화시키기 위하여 70℃의 오븐에서 건조되었다. 비고결된 시료와의 비교를 위하여, 공기중 낙사법으로 시료를 몇 개 더 조성하였다. 이와 같은 방법으로, 모든 조성된 시료의 높이는 약 200mm로 설정하였다.

지반의 간략한 층상탐지에 사용되는 초소형 마이크로콘(Lee et al. 2009-b)을 이용하여 깊이에 따른 고결된 시료의 강도변화를 조사하였다. 그림 1과 같이, 마이크로콘의 외경은 5mm이고, 투영된 면적은 19.6mm^2 이며,

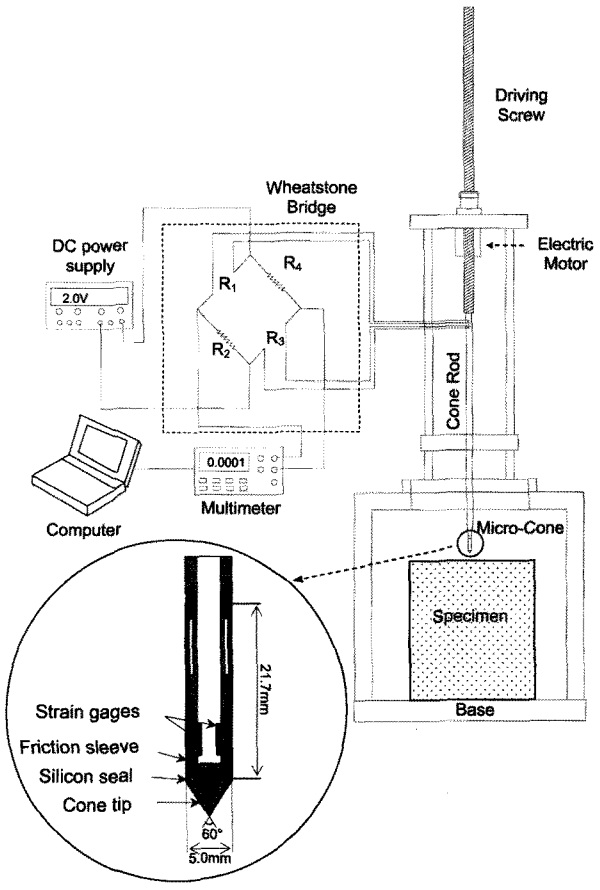

그림 1. 콘 선단저항력 측정 시스템

시료 대 콘의 직경비는 30이다. 마이크로콘은 콘 선단저항력과 주면마찰력을 효과적으로 분리하도록 이중관 방식으로 설계되었다. 관은 스테인레스 강으로 이루어져 있다. 그림 1의 하프 휘스톤브릿지의 구조를 위해서, 관의 내부에 2개의 스트레인 게이지를 부착하였고, 외부에도 2개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 마이크로콘은 전기모터를 이용하여 1mm/sec의 속도로 관입되었다.

마이크로콘 관입기에 의해 평가된 콘 선단저항력을 그림 2에 나타내었다. 그림 2는 유효응력의 증가 때문에 깊이에 따라 비고결된 시료의 콘 선단저항력이 포물선 모양으로 증가하고 있음을 보여준다. D_{50}=0.26mm인 고결된 시료의 콘 선단저항력은 맨 위층의 10mm두께에서 가장 높게 나타났다. 즉, 최대 콘 선단저항력은 시료의 바닥으로부터 약 190mm 떨어진 지점에서 발생하였다. 이 층에서의 콘 선단저항력은 비고결된 시료의 콘 선단저항력보다 15~20배정도 더 크게 측정되었다. 콘 선단이 고결된 영역을 관입한 후의 콘 선단저항력은 비고결된 시료의 콘 선단저항력과 유사한 값을 보였다. 여기서, 비고결된 시료의 콘 선단저항력과 유사하다는 것은 고결영역보다 아래에 위치한 영역이 거의 고결되지 않았음을 의미한다. D_{50}=0.50mm인 고결된 시료의 콘 선단저항력은 시료의 바닥으로부터 90~120mm 떨어진 지점에서 가장 높았다. D_{50}=1.29mm인 고결된 시료에서는 깊이가 증가함에 따라 콘 선단저항력이 증가하였다. D_{50}=1.29mm인 고결된 시료의 콘 선단저항력은 깊이가 160~180mm인 곳에서 비고결된 시료의 콘 선단저항력보다 약간 크게 평가되었다. 여기서 주목해야 할 것은 직경 5mm의 초소형 마이크로콘은 D_{50}=0.50mm, 1.29mm 시료의 표면근처에 위치한 얇은 고결층을 감지 못했다는 점이다. 이와 같이, 콘 선단저항력 주상도는 모세관 높이에 영향을 주는 입자크기에 연관됨을 보여준다.

3. 전기전도율

입상재의 소금고결화에서 모세관력의 효과는 시료의 깊이에 따른 소금농도를 측정함으로써 조사되었다.

본 연구에서는 D_{50}=0.26mm, 0.50mm, 1.29mm인 세 종류의 글라스비즈를 사용하였다. 이들 글라스비즈는 내부치수가 폭 40mm, 길이 40mm, 높이 200mm인 아크릴 사각셀에 조성하였다. 고결된 글라스비즈를 쉽게 꺼낼 수 있도록 셀의 한쪽 벽면이 분리되도록 설계하였다. 시료는 0.05M의 소금물을 셀에 채우고 글라스비즈를 수중 낙하시켜 시료의 높이가 약 190mm되도록 하였다.

소금의 고결을 위하여 70℃로 고정된 오븐에서 시료

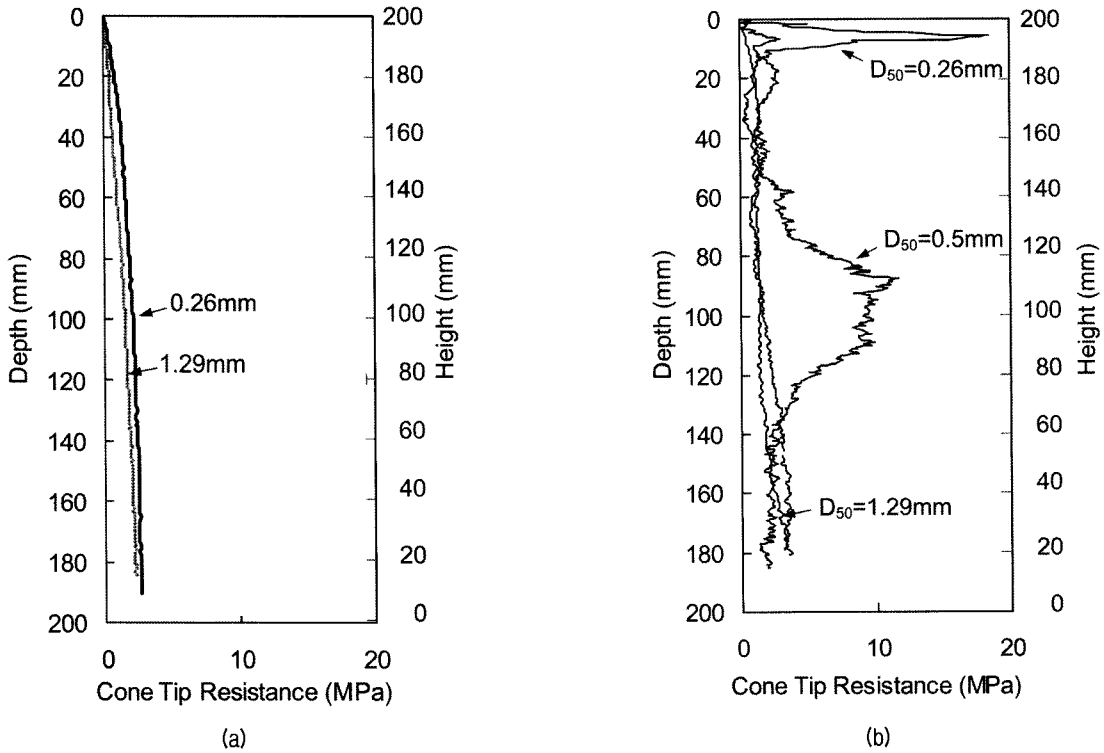

그림 2. 선단저항력 주상도: (a) 비고결된 시료; (b) 고결된 시료

를 건조시켰다. 건조과정중 포화도는 일정시간에서의 포화시료의 무게변화량을 측정함으로써 산정하였다. 시료의 완전한 건조를 위해서는 약 20일이라는 긴 시간이 소요되었다. 글라스비즈 시료가 완전히 건조된 후, 시료는 실내온도 20℃에서 식혀졌다. 셀의 한쪽 벽면을 분리한 뒤, 각 위치에서 20g의 건조고결된 글라스비즈를 빼내어 0.2리터의 증류수와 혼합하였다. 고결된 글라스비즈가 증류수에 용해된 후, 전기전도율 측정기를 이용하여 전기전도율을 측정하였다.

시료의 포화도는 그림 3(a)와 같이, 시간이 흐름에 따라 연속적으로 모니터링되었다. 또한, 단위시간(h)당 측정된 포화도의 감소량(%)을 의미하는 건조속도를 포화도에 따라 그림 3(b)에 나타내었다. 시간경과에 따른 포화도의 변화는 이중선형거동 즉, 초기의 건조속도가 그 이후의 건조속도보다 큰 이중선형 거동을 보여준다. 한 가지 주목해야 할 점은 세 종류의 시료에서 건조속도는 초기에 모두 유사하다는 것이다. 입자크기가 더 작은 경우, 초기 건조속도의 지속시간이 더 길다. 따라서, 그림 3(a)와 같이, 입자의 크기가 작을수록 시료의 완전건조를 위해 요구되는 시간이 짧아진다. 건조속도와 포화도의 관계를 그림 3(b)에 나타내었는데, 건조속도는 포화도가 감소함에 따라 연속적으로 감소하는 것으로 나타났다. 여기서, 건조속도의 감소는 시료의 상부에서 발생한 고결화와 관련됨을 알 수 있다. 이와 비슷한 현상이 글라스비즈-카올리나이트 혼합재에서도 발생하는 것을 Cho and Santamarina(2001)가 보고한 바 있다.

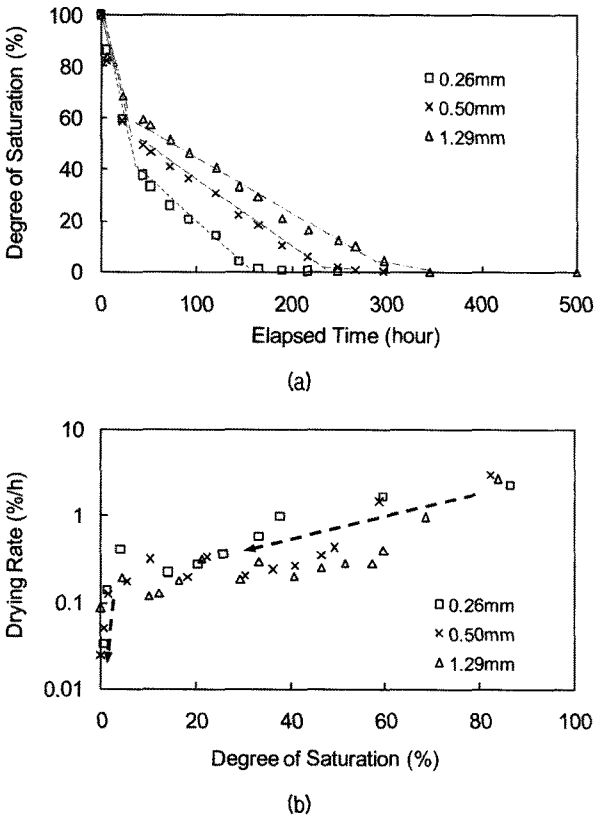

그림 3. 건조과정: (a) 포화도와 경과시간의 관계; (b) 건조속도와 포화도의 관계

깊이에 따른 고결된 시료를 용해시킴으로써 얻은 전기전도율 주상도를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서와 같이, 3개 시료의 전기전도율 주상도가 유사함을 보여준다. 전기전도율은 시료의 표면으로부터 깊이 20mm까지 영역에서 높은 값을 나타내었다. 표면에서의 전기전도율은 입자크기가 작아질수록 증가하였다. D_{50}=0.26mm 시료에서 전기전도율은 깊이에 따라 연속적으로 감소하였다. 즉, 표면에서의 전기전도율이 가장 높게 나타났다. 반면에, D_{50}=1.29mm 시료에서 전기전도율은 바닥과 표면에서 가장 높게 나타났다. 특히, 바닥으로부터 높이 40mm까지의 영역에서 높은 전기전도율의 값을 보였다. 한편, D_{50}=0.50mm 시료에서의 전기전도율은 표면으로부터 깊이에 따라 감소하다가 높이 76~115mm 구간에서 약간 높은 값을 보인 후, 다시 시료바닥까지 감소하는 경향을 나타냈다.

전기전도율 주상도는 입자크기에 영향받는 고결된 소금의 분포에 비례하여 나타난다. 시료의 표면에서 물을 이동시키는 주요인자인 모세관력은 입자크기가 작

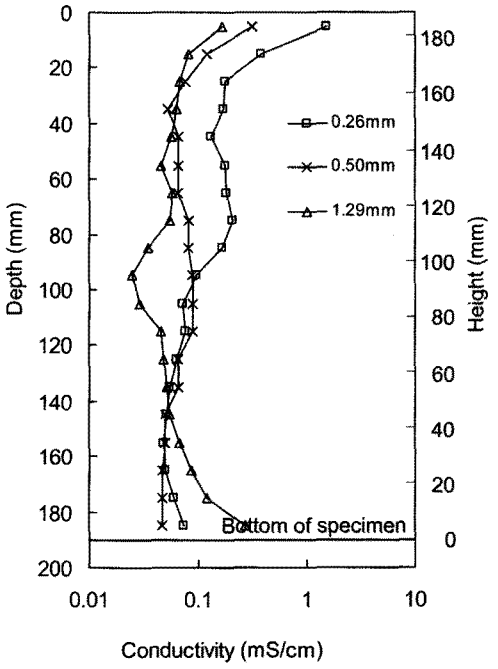

그림 4. 고결된 시료의 전기전도도 주상도

아질수록 커지게 된다. 또한, 건조속도는 그림 3(a)에서와 같이 입자크기가 작은 경우에 더 빠른 값을 보였다. 따라서, 입자크기가 작을수록 표면의 소금농도는 높은 값을 나타내었다. 이와 같은 결과로부터, 물의 증발로 인한 입상재의 자연적인 고결작용은 깊이와 입자크기에 따라 달라진다고 판단된다.

4. 사진 이미지

사진 이미지을 촬영하기 위해, 시료는 전기전도율 측정에 사용된 사각셀에 조성하였다. 또한, 건조과정동안 소금의 이동변화를 관찰하기 위해 붉은색 잉크를 0.05M의 소금물에 첨가하였다. 글라스비즈는 수중강사법을 이용하여 높이 190mm로 조성하였다. 건조과정중 시료의 무게를 연속적으로 기록하였고, 사진 이미지는 고해상도 디지털카메라를 이용하여 촬영하였다.

그림 5와 그림 6에 포화도에 따른 시료내 소금의 이동을 사진 이미지로 나타내었다. 그림 5에서는, D_{50}=0.26mm 시료의 포화도가 감소함에 따라, 점선으로 나타낸 소금영역이 점점 작아지며 상부로 이동하는 것을 보여준다. 완전건조 후, 점선으로 나타낸 소금영역은 시료의 상부표면에 국한되어 있음이 확인되었다. 이로부터, D_{50}=0.26mm 시료에서 모세관 높이는 190mm보다 높다고 판단된다. 그림 6은 건조과정동안 다른 입자크기로 인하여 모세관

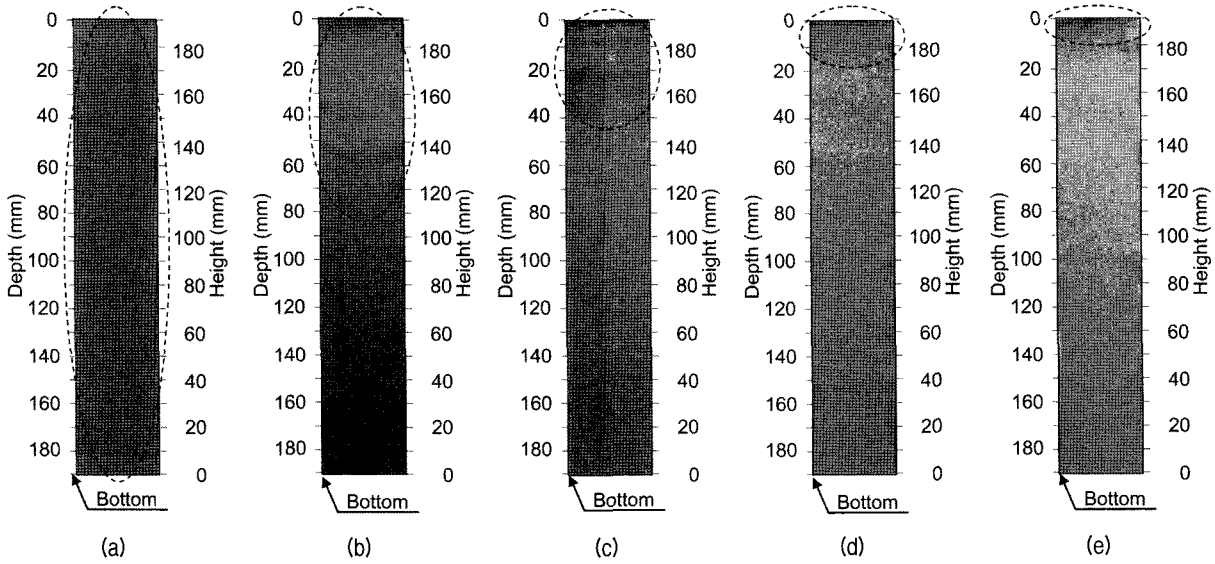

그림 5. 건조과정의 사진 이미지(D_{50}=0.26mm, 소금농도=0.05M): (a) S=100%; (b) S=50%; (c) S=20%; (d) S=10%; (e) S=0%

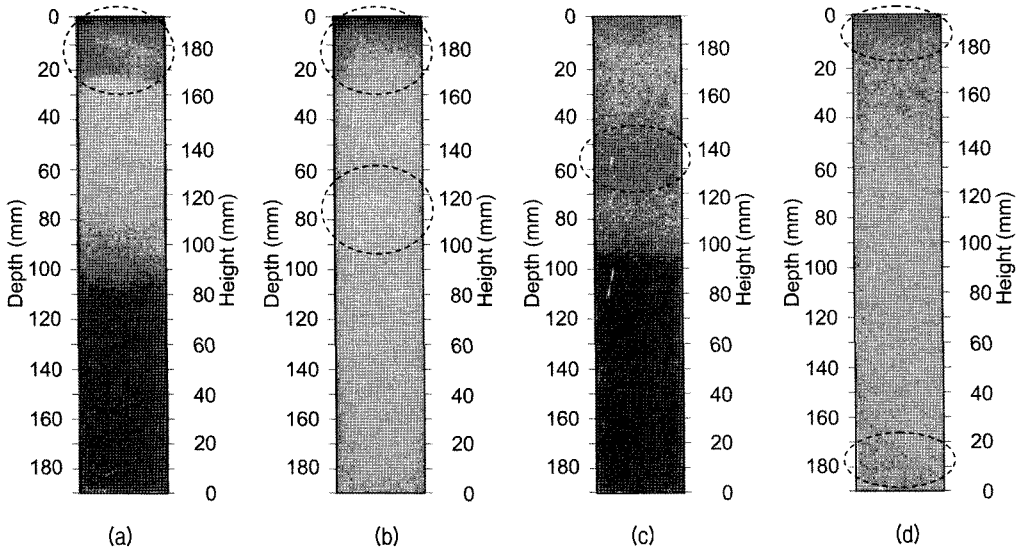

그림 6. 건조과정의 사진 이미지(소금농도=0.05M): (a) D_{50}=0.5mm, S=50%; (b) D_{50}=0.5mm, S=0%; (c) D_{50}=1.29mm, S=50%; (d) D_{50}=1.29mm, S=0%.

높이가 다르게 발생함을 보여준다. 모세관 높이가 D_{50}= 0.50mm 시료의 경우 약 90~130mm 이고, D_{50}=1.29mm 시료의 경우 20mm로 나타났다. 이와 같이, 모세관력은 시료 안에서 소금농도에 상당한 영향을 주는 것으로 확인되었다.

5. 탄성파의 스캐닝

전기전도율 측정을 위해 제작된 사각셀을 이용하여, 그림 7과 같이 시료의 깊이를 따라 탄성파 스캐닝을 수행하였다. 탄성파 스캐닝을 위해 0.05M 소금물에 수중낙하된 세 종류의 글라스비즈(D_{50}=0.26, 0.50 and 1.29 mm)가 시료로 사용되었다.

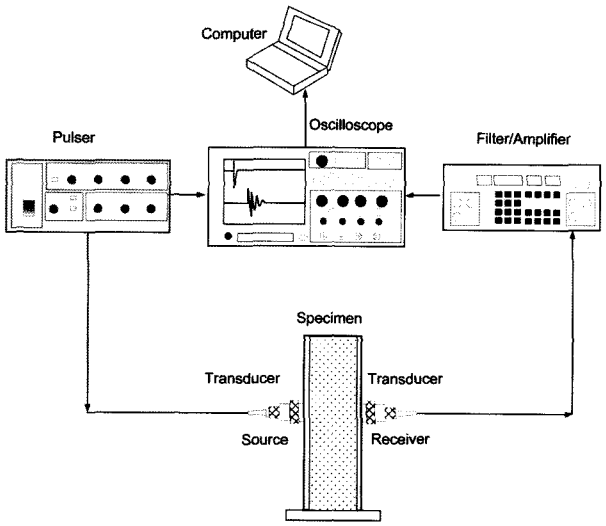

그림 7. 탄성파 스캐닝을 위한 실험 구성도

탄성파 스캐닝을 위해 펄서(JSR DPR 300)와 필터(Krohn-Hite 3945) 그리고 오실로스코프(Agilent 54624A)를 사용하였다. 또한, 입자크기와 해상도 그리고 파장을 고려하여 P파 트랜스듀서(Ultran GC50-019-X)를 선택하였고, 트랜스듀서의 주파수는 50kHz로 설정하였다. 그림 7에 실험을 위한 측정장비의 구성도를 나타내었다. 트랜스듀서와 셀의 벽 사이에 그리스를 얇게 바른 후, 깊이에 따라 시료 표면으로부터 바닥까지 스캐닝을 하였다. 스캐닝을 수행한 후, 실험을 통해 얻은 이미지를 분석하기 위하여, 스태킹 수는 32~64로 설정하였다.

시료를 통해 스캔한 P파는 신호보상, 복조변조, 신호제거와 같은 신호처리를 통하여 명암모드(B-mode) 이미지로 변환된다(자세한 내용은 Lee et al. 2009-a 참조). 신호처리를 통해 변환된 B-mode 이미지는 그림 8과 같이 나타났다. 스캐닝 이미지에서 밝은 영역은 시료의 높은 강성으로 인하여 탄성파의 진폭이 높음을 가리킨다. 그림 8은 D_{50}=0.26mm 시료의 경우, 표면으로부터 높이 160mm까지 밝은 영역이 분포됨을 보여주었다. 또한 D_{50}=0.50mm시료와 1.29mm 시료의 경우, 각각 높이 80~110mm, 0~40mm에서 밝은 영역이 존재함을 보여주었다.

6. 탄성파의 프로세스 모니터링

P파는 건조과정동안 깊이를 따라 연속적으로 측정하

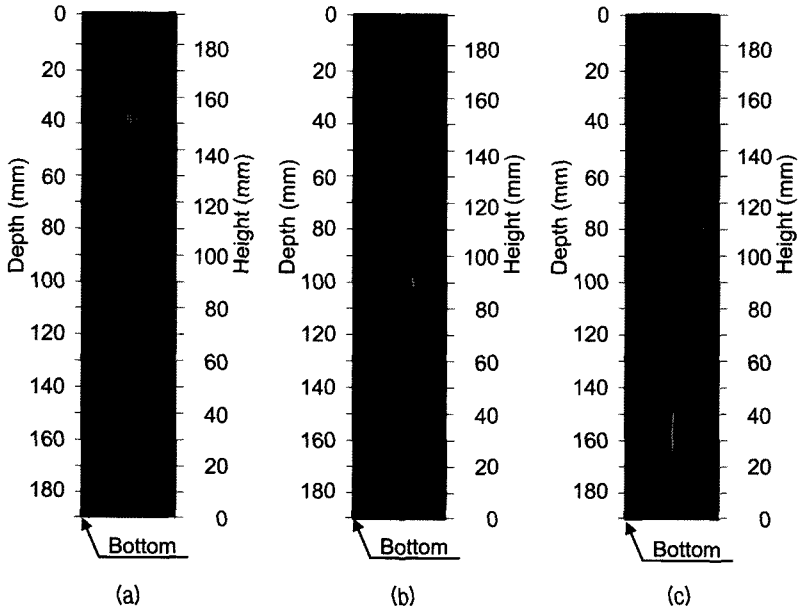

그림 8. 탄성파 스캐닝 이미지: (a) D_{50}=0.26mm 시료의 P파 이미지; (b) D_{50}=0.5mm 시료의 P파 이미지; (c) D_{50}=1.29mm 시료의 P파 이미지

였고, 이에 따라 P파 속도와 포화도의 관계를 얻었다.

본 절에서는 오직 D_{50}=0.50mm의 글라스비즈을 0.5M 소금물에 수중강사법을 이용하여 시료를 조성하였다. 실험에 사용된 셀은 두께 5mm인 플렉시 유리를 사용하여 내부의 폭과 길이가 94 mm, 높이가 135mm가 되도록 제작하였다.

피에조 디스크 엘리먼트를 사용하여 P파를 발신 및 수신하였다. 피에조 디스크 엘리먼트는 원형금속평판에 압전물질로 덮여있다. 압전물질의 직경은 11mm이고, 금속평판의 직경은 15mm이며 피에조 디스크 엘리먼트의 전체두께는 0.45mm이다. 시료를 통과하는 탄성파를 발신 및 수신하기 위해, 신호발생기(Agilent 33220A), 필터(Krohn-Hite 3945), 오실로스코프(Agilent 54624A)의 장비가 사용되었다. 획득된 신호와 관련없는 고주파수의 잡음을 제거하기 위해 신호는 1024개를 평균하여 얻었다.

그림 9와 같이, 높이 135mm로 조성된 포화시료는 오븐에서 온도를 60℃로 유지하여 건조되었다. 건조과정 동안 포화도를 측정하기 위해 시료의 무게를 일정시간마다 기록하였고, 동시에 P파도 측정하였다. 시료무게와 P파의 측정은 시료가 오븐 안에 있는 상태에서 이루어졌다. 따라서, 교란을 일으킬 진동은 발생하지 않았고, 실험은 시료 안의 물이 완전히 증발할 때까지 수행하였다.

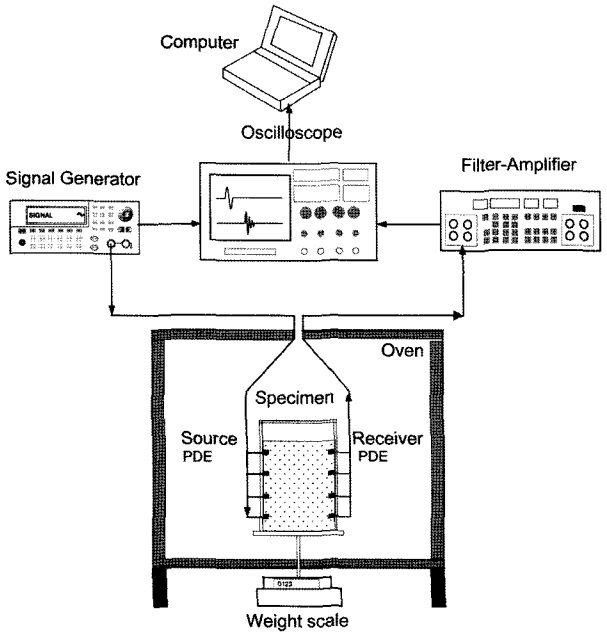

그림 9. P파의 프로세스 모니터링을 위한 실험 구성도(PDE는 피에조 디스크 엘리먼트)

깊이에 따른 P파 속도와 포화도의 관계를 그림 10에 나타내었다. 피에조 디스크 엘리먼트는 시료의 바닥으로부터 30mm, 60mm, 85mm, 110mm 높이에 설치되었다. P파 속도의 변화는 다음과 같이 세 단계로 구분할 수 있다: (1) 포화도 80%이상인 경우, P파 속도는 포화도가 감소함에 따라 감소한다; (2) 포화도 80%부터 10~40%사이 범위에서는, P파 속도가 안정된 값을 유지한다; (3) 포화도가 10~40%이하인 경우, P파 속도는 포화도가 감소함에 따라 점점 증가한다. 시료바닥에 가까운 높이 30mm의 경우 포화도가 80%이하인 구간에서 P파 속도는 거의 일정하였다.

그림 11은 P파 속도와 시료 깊이의 관계를 보여준다. 그림 11에서 고결된 시료의 P파 속도는 깊이가 증가함에 따라 감소한다. 이처럼 표면근처에서 속도가 더 빠른 이유는 소금의 고결작용이 발생하기 때문이다. 반면, 공기중 낙하되어 조성된 비고결된 시료의 P파 속도는 유효중량효과 때문에 깊이가 증가함에 따라 증가한다. 측

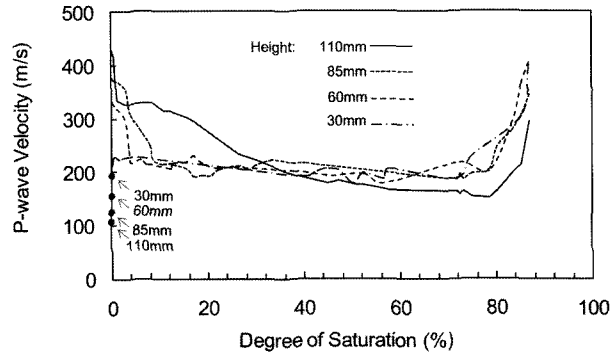

그림 10. 깊이에 따른 P파 속도와 포화도의 관계(D_{50}=0.50mm)

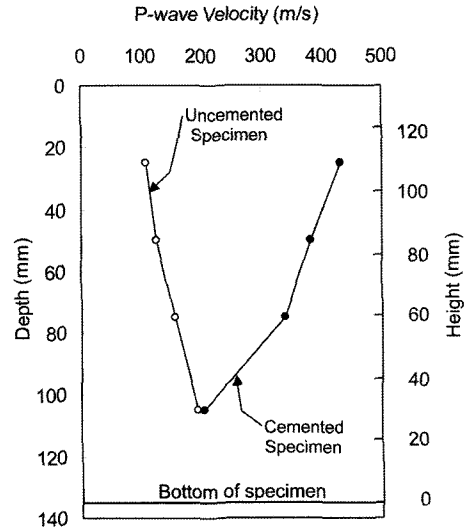

그림 11. 고결된 시료와 비고결된 시료에서의 P파 속도(D_{50}=0.50mm)

정높이 30mm에서의 P파 속도는 비고결된 시료와 고결된 시료에서 거의 비슷하였으나, 측정높이가 높아짐에 따라 고결효과로 인하여 고결된 시료와 비고결된 시료의 속도차이가 관찰되었다. 속도차이는 표면에서 최대로 나타났고, 깊이에 따라 속도차이는 점점 감소하였다.

7. 분석 및 고찰

실험결과로부터 시료에서 고결화 작용이 주로 발생하는 영역의 높이가 입자크기에 영향받음을 확인하였다. 이와 같은 고결영역의 높이는 D_{50}=0.26mm 시료의 경우 190mm보다 높고, D_{50}=0.50mm 시료의 경우 90~120mm이며, D50=1.29mm 시료의 경우 30~40mm보다 낮다.

모세관 효과로 인해 입자크기는 고결된 소금의 분포에 영향을 준다. 건조과정동안 간극속의 물은 중력으로 인해 시료의 바닥으로 내려가려는 잠재력을 가진다. 반면, 물은 모세관력으로 인해 시료를 통하여 위로 올라가게 된다. 직경 d인 관에서 모세관 높이는 다음과 같다.

$$h=\frac{4T_S\cos\alpha}{d\rho_w g} \tag{1}$$

여기서, T_s(=64.4 mN/m)은 표면장력을 나타내고,ρ_w(=1g/cm^3)은 물의 밀도를 나타낸다. 그리고 g(=980cm/s^2)은 중력가속도이고, α는 접촉각이다. 단일크기로 구성된 구형 입상재에서 모세관 높이는 식 (1)의 d대신에 관의 등가직경 d_t를 채택함으로써 평가될 수 있다. 등가직경 d_t는 간극률에 영향을 주는 패킹유형에 따라 달라진다. 기하학적 패킹유형에 따라 산정된 등가직경 d_t의 값을 표 2에 정리하였다.

크기가 다른 세 종류의 글라스비즈에서 모세관 상승의 상부경계와 하부경계는 단순입방구조와 면심입방구조의 두 가지 패킹유형에 의해 산정할 수 있다. 접촉각이 0일 때, 해석적 방법으로 산정된 모세관 상승높이를 표 3에 요약하였다. 모세관 상승 높이는 D_{50}=0.26mm 시료의 경우 130mm~249mm, D_{50}=0.50mm 시료의 경우 68mm~130mm, D_{50}=1.29mm 시료의 경우 26mm~54m로 계산되었다. 이와 같이, 실험으로부터 얻은 고결된 소금영역의 높이는 해석적 방법으로 산정된 모세관 상승높이와 유사하다.

단일구형입자에서 입자크기와 간극률 n에 따른 모세관 상승은 Carman(1941)이 다음과 같이 제안하였다.

$$h=\frac{6(1-n)}{n}\frac{T_S}{\rho_w gD} \tag{2}$$

여기서, D는 구형입자의 직경을 나타낸다. 식 (2)에 의해 계산된 모세관 상승높이은 표 3에 정리하였다. Carman의 모세관 상승 높이는 D_{50}=0.26mm 시료의 경우 226mm, D_{50}=0.50mm 시료의 경우 118mm, D_{50}=1.29mm 시료의 경우 45mm로, 실험으로 얻은 고결된 소금영역의 높이와 거의 일치한다.

8. 결 론

입상재료에서 소금의 고결화에 미치는 모세관 효과는 마이크로콘 관입실험, 전기전도율 측정, 사진 이미지 분석, 탄성파 스캐닝, 탄성파를 이용한 프로세스 모니터링을 이용하여 조사하였다. 먼저, 직경 5mm의 마이크로콘 관입기에 의해 1mm/sec의 속도로 관입하여 콘 선단저항력을 측정하였다. 둘째로, 분리가능한 사각셀에 조성된 시료에서 동일한 양의 완전건조된 글라스비즈를 깊이별로 빼내어 증류수에 용해시킨 후 전기전도율을 측정하였다. 셋째로, 건조과정동안 고해상도 디지털카메라를 이용하여 사진 이미지를 촬영하였다. 넷째로, 50kHz의 트랜스듀서를 이용하여 시료의 깊이에 따라 P파를 스캔하였고, 스캐닝결과를 명암모드로 변화하였다. 마지막으로, 건조과정동안 시료의 깊이에 따라 설치된 4쌍의 피에조 디스크 엘리먼트를 통하여 P파를 발신 및 수신함으로써 소금의 고결작용을 프로세스 모니터링하였다.

고결된 시료에 마이크로콘을 관입하여 측정한 콘 선단저항력으로부터 시료의 강도에 관한 주상도를 얻었다. 콘 선단저항력 주상도에서 단단한 층은 D_{50}=0.26mm 시료의 경우 맨 위에서, D_{50}=0.50mm 시료의 경우 중간에서, D_{50}=1.29mm 시료의 경우 바닥에서 발생함을 보여주었다. 측정된 전기전도율을 통해, 소금의 분포가 입자크기에 영향받음을 확인하였다. 즉, 입자크기가 작아질수록, 표면에서의 소금농도는 더 높아졌다. 그러나, D_{50}=1.29mm 시료의 경우 바닥에서의 전기전도율이 가장 높게 나타났다. 사진 이미지는 시료 안에서 용해된 소금에 따른 컬러잉크의 이동을 보여주었다. 탄성파 스캐닝에 의한 평가에서, 고결화에 의한 강성이 큰 층은 입자크기가 작은

경우 시료표면에서 나타나고, 입자크기가 큰 경우 시료바닥에서 관찰되었다. 탄성파에 의한 프로세스 모니터링에서, 소금의 고결화작용이 시료바닥에서는 작지만, 시료표면에서는 큰 것을 확인하였다. 실험에서 관측된 고결된 소금영역의 높이는 해석적 방법으로 산정한 모세관 높이와 유사하였다. 이와 같이, 위의 5가지 실험은 흙과 같은 입상재료에서 소금의 고결화에 대한 모세관 효과의 일관된 경향을 보여주었다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2009-0075809)을 밝히며 깊이 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Abduljauwad, S. N., and Al-Amoudi, O. S. B. (1995), "Geotechnical behaviour of saline sabkha soils", *Geotechnique*, 45(3), 425-445.
2. Carman, P. C. (1941), Capillary rise and capillary movement of moisture in fine sands. *Soil Science*. 52(1), 1-14.
3. Cho, G. C. and Santamarina, J. C. (2001), "Unsaturated particulate materials - particle-level studies", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(1), 84-96.
4. Consoli, N. C., Schnaid, F., and Milititsky, J. (1998), "Interpretation of plate load tests on residual soil site", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 124(9), 857-867.
5. Coop, M. R., and Atkinson, J. H. (1993), "The mechanics of cemented carbonate sands", *Geotechnique*, 43(1), 53-67.
6. Coop, M. R., and Willson, S. M. (2003), "Behavior of hydrocarbon reservoir sands and sandstones", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 129(11), 1010-1019.
7. Cuccovillo, T., and Coop, M. R. (1999), "On the mechanics of structured sands", *Geotechnique*, 49(6), 741-760.
8. Fonseca, A. V. d., Fernandes, M. M., and Cardoso, A. S. (1997), "Interpretation of a footing load test on a saprolitic soil from granite", *Geotechnique*, 47(3), 633-651.
9. Ismael, N. F. (2001), "Axial Load Tests on Bored Piles and Pile Groups in Cemented Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 127(9), 766-773.
10. Lee, I. M., Truong, Q. H., Kim, D. H., and Lee, J. S. (2009-a), "Discontinuity detection ahead of a tunnel face utilizing ultrasonic reflection: laboratory scale application", *TUST, Elsevier*. 24(2), 155-163.
11. Lee, W. J., Shin, D. H., Yoon, H. K., and Lee, J. S. (2009-b), "Micro-cone penetrometer for more concise subsurface layer detection", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 32(4), doi: 10.1520/GTJ101712.
12. Leroueil, S., and Vaughan, P. R. (1990), "The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks", *Geotechnique*, 40(3), 467-488.
13. Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior - 3rd edition*, John Wiley & Sons. New York.
14. Truong, Q. H., Eom, Y. H. and Lee, J. S. (2009), "Characteristics of elastic waves according to cementation of dissolved salt", *Vadose Zone Journal, Soil Science Society of America. (Submitted)*.

(접수일자 2010. 1. 11, 심사완료일 2010. 4. 23)