

식물추출액을 이용한 지반 고결제 개발

Development of Soil Binder Using Plant Extracts

박 성 식¹ Park, Sung-Sik

최 선 규² Choi, Sun-Gyu

남 인 현³ Nam, In-Hyun

Abstract

This paper presents an environment-friendly sand cementation method by precipitating calcium carbonate using plant extracts. The plant extracts contain urease like *Sporosarcina pasteurii*, which can decompose urea into carbonate ion and ammonium ion. It can cause cementation within sand particles where carbonate ions decomposed from urea combine with calcium ions dissolved from calcium chloride or calcium hydroxide to form calcium carbonate. Plant extracts, urea and calcium chloride or calcium hydroxide were blended and then mixed with Nakdong River sand. The mixed sand was compacted into a cylindrical specimen and cured for 3 days at room temperature (18°C). Unconfined compression test, SEM and XRD analyses were carried out to evaluate three levels of urea concentration and two different calcium sources. As urea concentration increased, the unconfined compressive strength increased up to 10 times those without plant extracts because calcium carbonate precipitated more, regardless of calcium source. It was also found that the strength of specimen using calcium chloride was higher than that of specimen using calcium hydroxide.

요 지

본 연구에서는 식물추출액을 이용하여 모래 입자 사이에 친환경적으로 탄산칼슘을 석출시켜 모래 고결을 유발하고자 하였다. 식물추출액에는 고결유발 미생물(예: *Sporosarcina pasteurii*)과 같이 요소를 탄산이온과 암모늄이온으로 분해하는 우레아제 성분이 포함되어 있다. 분해된 탄산이온과 용액 속에 녹아 있는 칼슘이온이 결합하여 탄산칼슘을 석출시키는 원리를 이용하여 모래의 고결을 유도하였다. 깨끗한 낙동강모래에 식물추출액과 요소 그리고 칼슘원(염화칼슘 또는 수산화칼슘)을 혼합한 용액을 섞어서 비빈 다음 다짐방법으로 공시체를 제작하였다. 요소의 농도를 세 종류로 달리하였으며, 제작된 공시체를 실내(18°C)에서 3일 동안 양생시킨 다음 일축압축시험과 SEM 및 XRD분석을 실시하여 사질토의 고결 정도를 연구하였다. 칼슘원에 관계없이 요소의 농도가 높을수록 탄산칼슘이 더 많이 침전되어 일축압축강도는 식물추출액을 사용하지 않은 경우보다 최대 10배까지 증가하는 경향을 보였다. 염화칼슘을 사용한 공시체가 수산화칼슘을 사용한 경우보다 더 높은 강도를 나타내었다.

Keywords : Calcium Carbonate, Cementation, Plant extracts, Unconfined compressive strength, Urea

1 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 토목공학전공 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., sungpark@knu.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 경북대학교 건축토목공학부 토목공학전공 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ)

3 비회원, 한국지질자원연구원 지질재해연구실 선임연구원 (Senior Researcher, Geologic Hazards Dept., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

연약지반이나 현장 흙을 고결시킬 때 고결제로 시멘트를 가장 많이 사용하고 있으며, 지반 천공 후에 형성되는 공극이나 자연적으로 형성된 공극을 메우고 지하수를 차단하기 위한 차수벽 형성을 위하여 시멘트풀을 사용하고 있다. 시멘트의 원료가 되는 석회석은 국내에 비교적 풍부하게 매장되어 있으나(300억 톤) 이를 채광하는 과정에서 자연환경이 훼손될 뿐 아니라 시멘트 1톤을 생산하기 위해서는 약 0.9톤의 이산화탄소가 발생하며 이렇게 발생한 이산화탄소는 대표적인 온실가스로 지구 온난화의 주범이 되고 있다. 따라서 최근에는 시멘트를 대체하거나 시멘트 사용량을 저감할 수 있는 친환경 건설재료 개발에 대한 연구가 시도되고 있다(김선태 등 2011; 이병호 등 2010). 그 예로, 땅속에 존재하는 다양한 종류의 세균을 비롯한 미생물은 주어진 환경이 적합할 경우 미생물 주변에 탄산칼슘과 같은 광물질을 생성하게 되며 이렇게 흡입자 사이에 침전된 탄산칼슘은 흙의 고결을 유발하게 된다. 최근 국내외에서 여러 연구자들이 *Sporosarcina pasteurii*와 같이 자연상태 흙에 존재하는 미생물의 대사활동을 이용하여 친환경적으로 흙을 고결시킬 수 있는 연구를 시도하고 있다(김대현 등 2010; 박성식 등 2011; Mitchell and Santamarina 2005; DeJong et al. 2006; Whiffin et al. 2007; Terajima et al. 2009; Kawasaki et al. 2010; Van Paassen et al. 2010). 하지만 이와 같이 미생물을 이용한 고결기술은 미생물 대사활동에 의한 요소 분해로부터 얻어지는 탄산염이온과 염화칼슘 용액으로부터 얻어지는 칼슘이온의 반응으로 탄산칼슘을 침전시키는 방법으로서 미생물의 반응을 위한 pH 및 배양액 조건과 미생물의 원활한 통과를 위한 흡입자의 크기 및 공극비의 한계가 있는 문제점이 있다. 뿐만 아니라, 적용대상인 흙의 종류도 기존에 사용되고 있는 미생물의 크기를 고려하였을 때 모래와 실트에 국한되며, 적절한 수분함량의 범위를 비롯한 미생물의 생장에 적합한 온도범위가 상온(30°C)에 국한되는 등의 적용상의 한계가 있다.

본 연구에서는 우레아제 성분을 포함하고 있는 식물에서 추출한 용액을 이용하여 탄산칼슘을 석출시키는 방법으로 지반을 고결시키고자 하였다. 따라서 배양이나 성장과정 필요 없이 바로 식물추출액을 이용하여 탄산칼슘을 석출시킬 수 있는 고결제 개발을 비롯하여 최적 배합비를 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 또한 식

물추출액을 혼합한 모래를 이용하여 직경 5cm의 소형공시체를 제작한 다음 이를 이용하여 일축압축시험, SEM(scanning electron microscope) 및 XRD(X-ray diffraction) 분석을 실시하였으며, 요소 농도와 칼슘원에 따른 탄산칼슘 석출 정도(천우영 등 2008; 안지환 등 1996), 고결 여부 및 고결로 인한 강도 증가를 분석하였다.

2. 식물추출액을 이용한 고결제 개발

2.1 고결제의 성분 및 배합비

기존 국내외 몇몇 연구자들은 미생물을 이용하여 흙을 고결시키는 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 미생물 대신 식물추출액을 이용하여 모래 입자 사이에 탄산칼슘을 석출시켜 모래를 고결시키는 고결제 개발에 관한 연구를 수행하였다. 고결제에 사용된 기본 재료는 증류수, 요소(urea), 염화칼슘 또는 수산화칼슘, 그리고 식물추출액이다.

고결제 성분 중에서 요소를 분해하는데 필요한 식물추출액의 양을 어떻게 결정할 것인가가 가장 중요하다. 즉, 고결성능을 최대화하기 위한 최적의 요소:식물추출액 혼합비를 결정하는 실험을 수행하였다. 먼저, 증류수 1000ml에 식물추출물 500g을 분쇄기에 넣고 갈아 망을 이용하여 1차 원액을 추출하였다. 1차 원액을 초고속 원심분리기에 넣고 4°C에서 24,000RPM으로 20분 동안 분리하여 2차 원액을 얻었다. 이렇게 분리된 식물추출액을 요소에 혼합하여 우레아제 활성 반응을 암모늄이온(NH₄⁺) 또는 수산화이온(OH⁻) 변화에 따른 pH 변화를 조사하여 최적의 요소와 식물추출액의 비를 결정하고자 하였다. 20ml 증류수를 부은 삼각 플라스크에 요소 5g을 넣고 20분간 교반하여 녹인 후, A 용액은 식물추출액을 2.5ml, B 용액은 5ml, C 용액은 20ml, D 용액은 25ml, E 용액은 35ml, F 용액은 75ml로 달리하여 시간에 따른 각각의 용액에 대한 pH 변화를 측정하였다. 식물추출액을 넣기 전 증류수에 요소를 녹인 용액의 pH는 7.45였다. 표 1의 결과에 의하면 B, C 용액의 시간에 따른 pH 변화가 다소 빠르게 상승하는 것으로 판단되었다. 하지만 식물추출액에 의해 요소에서 분해된 암모늄이온과 수산화이온이 반응하여 다시 암모니아(NH₃) 가스로 방출되기 때문에 전반적으로 pH는 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 즉, 염기성을 나타내는 OH⁻ 이온이 생성되었다가 다시 없어지기 때문에 pH 상승이 크지 않

표 1. 요소와 식물추출액을 혼합한 용액의 pH 측정 결과

구 분	pH 측정					
	A 용액* (2.5ml)	B 용액* (5ml)	C 용액* (20ml)	D 용액* (25ml)	E 용액* (35ml)	F 용액* (75ml)
식물추출액 추가 후	8.88	8.99	8.93	9.05	8.89	9.11
식물추출액 추가 후 1시간	9.41	9.48	9.42	9.45	9.41	9.40
식물추출액 추가 후 4시간	9.45	9.55	9.59	9.60	9.54	9.42
식물추출액 추가 후 10시간	9.59	9.62	9.64	9.64	9.58	9.46
식물추출액 추가 후 24시간	9.75	9.75	9.73	9.69	9.65	9.53
식물추출액 추가 후 48시간	9.74	9.76	9.75	9.71	9.66	9.57
식물추출액 추가 후 72시간	9.74	9.77	9.74	9.74	9.69	9.58

*괄호 안은 식물추출액 혼합량

았다. 따라서 pH 측정으로 요소의 분해 정도를 판단하기에는 어려움이 있었다.

따라서 식물추출액에 의해 요소가 분해되었을 경우 용액 속에 녹아 있는 탄산이온(CO_3^{2-})의 양을 알칼리도 분석으로 측정하여 요소 분해 정도를 정량적으로 측정함으로써 최적의 요소와 식물추출액 비를 결정하고자 하였다. 본 연구에서는 B, C 용액을 대상으로 알칼리도 분석을 실시하였다. pH 실험과 동일한 조건으로 B, C 용액을 만든 다음 측정 범위를 고려하여 각각의 용액을 1000배 희석한 후 초기 pH를 측정하였다. 그리고 0.02N 황산(H_2SO_4)용액을 사용하여 조금씩 떨어뜨려 pH 4.0~4.3 시점에서의 황산용액 투입량을 측정한 다음 알칼리도 분석법을 이용하여 탄산이온 양을 계산하였다. 2일 후에는 식물추출액이 4배 많이 들어간 C 용액의 탄산이온 농도가 2배 가까이 높았으나, 4일 후에는 B 용액과 C 용액의 탄산이온 농도가 거의 동일하게 측정되었다. 이는 식물추출액이 요소분해를 하는 우레아제 반응을 일으키는 촉매임을 나타내는 것일 뿐 아니라 촉매제 양이 많을수록 요소를 빠르게 분해할 수 있었다. 하지만 4일 후 탄산이온 농도는 동일한 것으로 분석되었다. 따라서 식물추출액:요소의 비는 1:1의 경우가 4:1의 경우보다 더욱 경제적이란 판단되어 식물추출액:요소 비를 1:1로 결정하였다. 한편 식물추출액의 최적 활성 온도는 35~45°C이며, 70°C 이상이 되면 효소가 파괴되어 요소분해 작용을 멈추게 된다.

요소와 염화칼슘의 비는 화학식을 이용하여 산정하였다. 탄산칼슘 1mol 생성을 위해서는 요소와 염화칼슘이 1mol씩 필요하다. 원자식 계산을 통하여 요소 60.05g과 염화칼슘 110.98g이 필요하므로 요소와 염화칼슘의 비는 1:1.85이며, 동일한 방식으로 수산화칼슘(74.09g)

표 2. 알칼리도 분석 결과

구분	CO_3^{2-} 농도(mg/l)	
	B 용액* (5ml)	C 용액* (20ml)
4시간 후	2,821	25,660
2일 후	15,848	28,703
4일 후	28,787	28,023

*괄호 안은 식물추출액 혼합량

표 3. 식물추출액을 이용한 고결제 배합비

구분	요소(g)	식물추출액(ml)	칼슘원(g)
염화칼슘	중량	25	46.25
	배합비	1	1.85
수산화칼슘	중량	25	31
	배합비	1	1.23

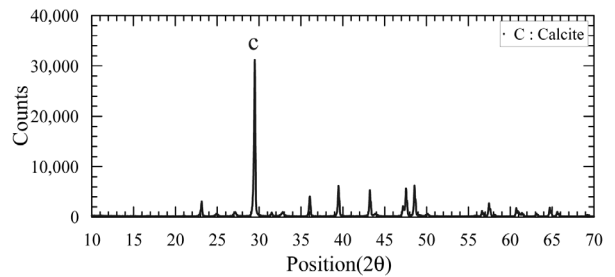
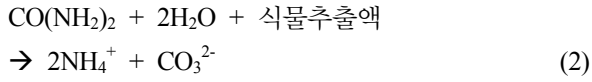
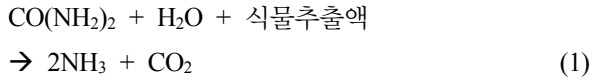


그림 1. 요소, 식물추출액 그리고 염화칼슘을 사용한 고결제의 XRD 분석 결과

과의 비는 1:1.23로 산정하였다. 위의 연구 결과를 토대로 표 3과 같이 적정 배합비를 결정하였다. 표 3과 같은 배합으로 염화칼슘을 사용한 고결제의 XRD 분석 결과 그림 1과 같이 탄산칼슘 중 calcite가 생성되는 것을 확인하였다. 탄산칼슘 결정질은 calcite, aragonite, vaterite와 같이 세 종류로 구분되며(한현각 등 2008), 그림 1은 calcite 결정질을 나타낸다.

탄산칼슘의 석출반응은 다음과 같다. 먼저, 요소에 식

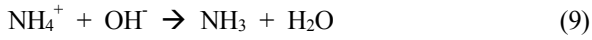
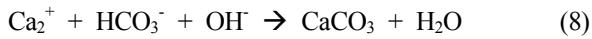
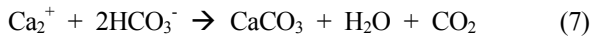
물추출액을 혼합하면 반응하는 물분자 수에 따라 다음과 같은 여러 반응이 복합적으로 발생한다.



위와 같은 반응에서 OH⁻ 이온 증가로 pH가 상승한다. 이러한 pH 상승으로 암모니아, 이산화탄소 가스는 조금 발생하며 다른 이온들은 용액 속에 존재하게 된다(용액이 산성일 때는 CO₂, 염기성일 때는 HCO₃⁻ & CO₃²⁻, 염기성일 때는 HCO₃⁻ 상태로 존재). 염화칼슘과 수산화칼슘을 물에 넣으면 다음 식과 같이 이온화된다.



요소와 식물추출액을 혼합한 제1용액에 수용액 상태의 칼슘원(염화칼슘, 수산화칼슘)을 투입하게 되면 용액 내 이온 상태에 따라 다음과 같은 탄산칼슘 생성반응이 일어나게 된다.



마지막으로 위의 식과 같이 OH⁻ 이온 감소로 pH가 변하며, 식 (9)와 같은 반응으로 암모니아 가스가 대량으로 발생하여 주변에 심한 냄새가 발생하게 된다.

2.2 시간에 따른 탄산칼슘 석출량

시간에 따른 탄산칼슘 석출량을 정량적으로 분석하여 기본적인 석출량 외에 최대 탄산칼슘 석출 시간을 구하고자 하였다. 고결제의 배합비는 2.1절과는 약간 달리 증류수 100ml, 요소 10g, 염화칼슘 20g, 식물추출액

5ml를 혼합한 다음 그 중 50ml를 100g의 낙동강 모래(그림 2)와 섞은 후 항온습습기(온도 28°C, 습도 75%)에 넣어 양생하였으며, 1, 2, 3, 4일 후의 탄산칼슘 석출량을 분석하였다. 분석방법은 고결 후 일정시간(1, 2, 3, 4일)이 지난 시료를 가루로 만든 후 산화알루미늄(98% 이상)을 20% 첨가하여 XRD 분석을 실시한 다음, 그 결과를 TOPAS 4.2(Bruker-AXS, 2008) 프로그램을 이용하여 정량적으로 탄산칼슘 석출량을 계산하였다. 그 결과는 그림 3과 같으며 4일 후 가장 높은 4.9% 정도의 탄산칼슘이 생성되었음을 알 수 있었다(Relative intensity는 반응기에 속해있는 전체 광물화학적 성분 중 실험에 의해 생성된 순수 calcite가 차지하는 부분을 의미). 한편 그림 4는 탄산칼슘이 석출된 모래를 1000배 확대한 SEM 사진으로 시간에 따른 변화를 관찰할 수 있다. 모래 입자 사이에 탄산칼슘이 3일과 4일 사이에 많이 침전된 것으로 보인다.

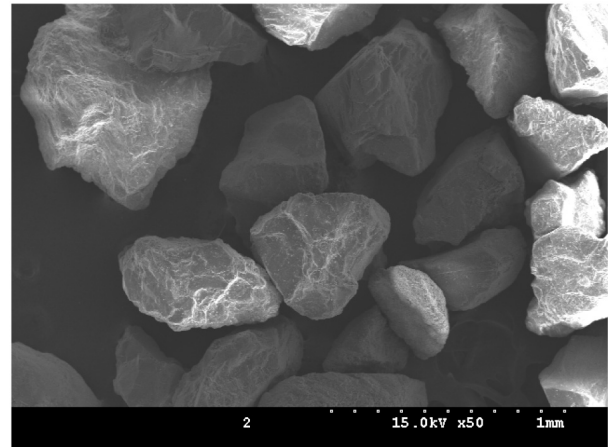


그림 2. 낙동강모래의 SEM 사진

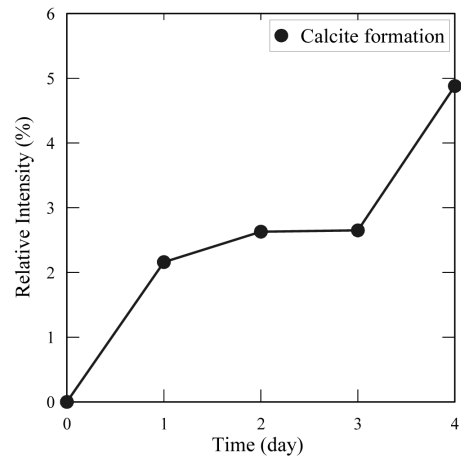
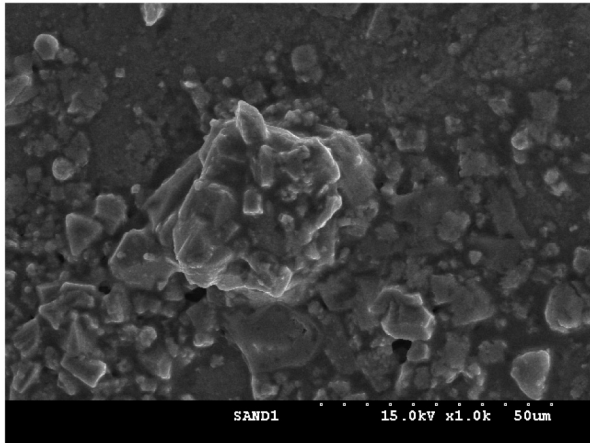
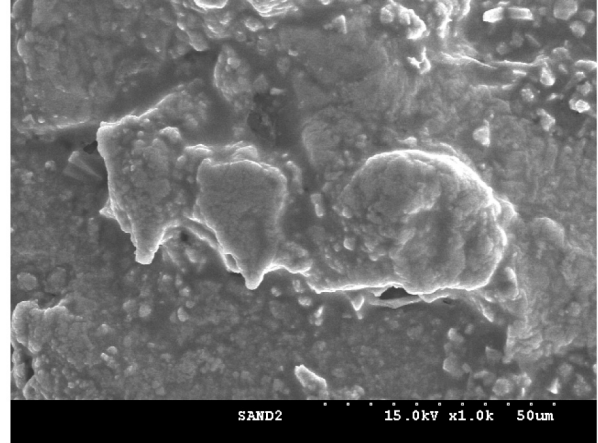


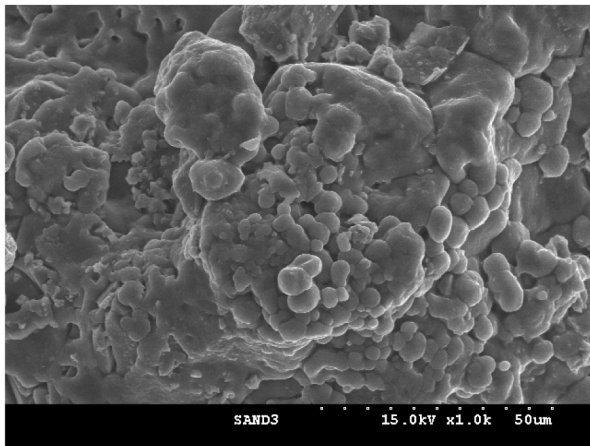
그림 3. 시간에 따른 정량적 탄산칼슘 석출량



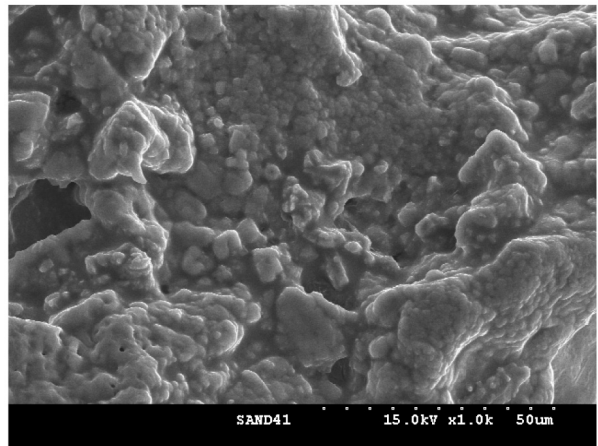
(a) 1일 후



(b) 2일 후



(c) 3일 후



(d) 4일 후

그림 4. 시간에 따른 탄산칼슘 석출 모습

3. 일축압축시험 및 결과

3.1 공시체 제작 및 종류

본 연구에서는 낙동강모래를 사용하였으며, 낙동강 모래의 SEM 사진은 그림 2와 같다. 모래 입자는 약간 모난 형태를 하고 있으며 색깔은 다소 붉은 색을 띠고 있다. 낙동강모래의 성분분석 결과에 의하면 낙동강모래는 실리카(이산화규소)가 78% 이상인 실리카질 모래로 통일분류법에 의해 빈입도 모래(SP)로 분류된다. 낙동강모래는 체분석을 하여 0.25-0.075mm의 입도를 가지도록 조정하였다. 요소에 정해진 양의 식물추출액을 넣어 혼합한 제1용액을 요소가 식물추출액에 의해 충분히 분해되도록 밀봉한 상태에서 3일 동안 상온에서 보관하였다. 식물추출액의 양은 3일 정도 경과한 후 식물추출액의 증가에 따른 요소분해 효과는 거의 동일하였으므로 요소와 동일하게 사용하였다. 칼슘원으로 앞서

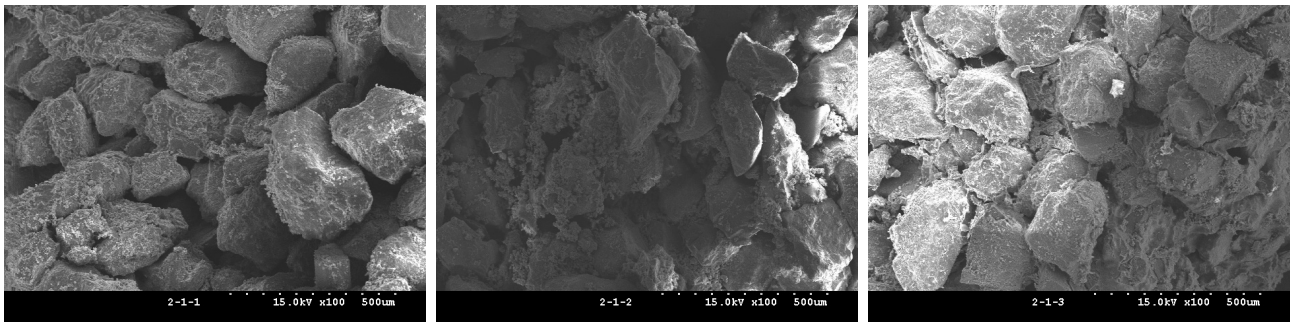
2.1절에서 계산된 칼슘량은 칼슘이 모두 용해될 경우에 해당하므로 염화칼슘보다 용해도가 100배 이상 낮은 수산화칼슘을 같이 사용한 본 실험에서는 제1용액에 칼슘원을 동일하게 10g씩 넣고 반응하도록 한 다음 모래와 비벼 공시체를 제작하였다. 표 4는 본 연구에서 제작한 공시체를 비교하고 있다.

3.2 SEM 사진 및 XRD 분석 결과

식물추출액과 요소의 비에 따른 시각적인 고결정도를 판단하기 위하여 SEM사진 분석을 실시하였다. 각 시료에 대하여 30, 50, 100배 확대한 SEM사진 분석을 실시하였으며, 염화칼슘에서 식물추출액과 요소가 증가할수록 침전물이 증가하고 촘촘해짐을 확인할 수 있었다. 그림 5는 100배 확대했을 때의 SEM사진 결과이다. 요소의 양이 증가할수록 모래 입자 사이에 침전되는 탄산칼슘의 양이 증가하고 모래 입자 주변으로 침전물이

표 4. 일축압축시험 조건 및 결과

Test ID	칼슘원	요소/물 (g/ml)	식물 추출액 (ml)	Dry density (g/cm ³)	Water content (%)	Max deviator stress (kPa)	Axial strain at Peak strength (%)
CC-0	염화칼슘 (Calcium Chloride)	25/50	0	1.55	2.78	30	0.83
CC-1		5/50	5	1.49	4.65	90	2.0
CC-2		10/50	10	1.46	2.66	160	1.86
CC-3		25/50	25	1.52	0.65	317	1.62
CH-0	수산화칼슘 (Calcium Hydroxide)	25/50	0	1.56	1.75	89	2.04
CH-1		5/50	5	1.49	0.27	197	1.8
CH-2		10/50	10	1.48	0.29	129	1.44
CH-3		25/50	25	1.47	0.37	244	1.49

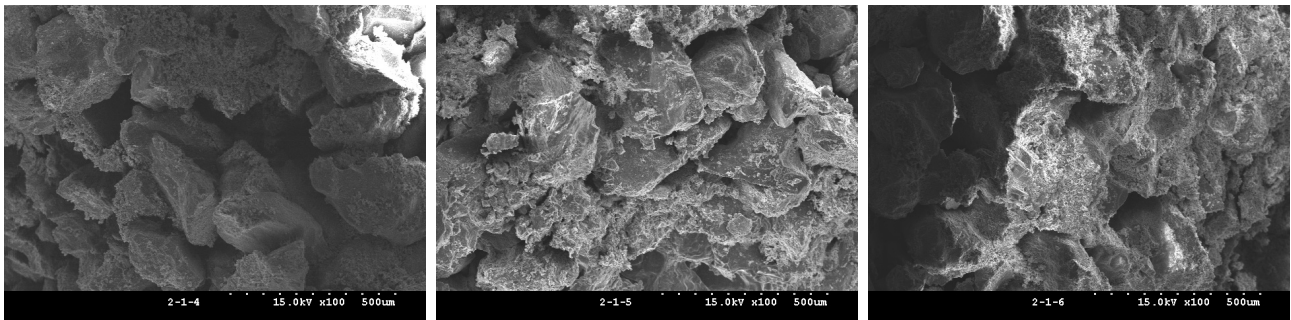


CC-1

CC-2

CC-3

(a) 칼슘원으로 염화칼슘을 사용한 경우



CH-1

CH-2

CH-3

(b) 칼슘원으로 수산화칼슘을 사용한 경우

그림 5. 식물추출액으로 고결된 공시체의 SEM 사진

많이 생기는 것을 육안으로 판별할 수 있었다.

XRD 분석을 통하여 사질토 내의 탄산칼슘 석출 유무를 확인하였다. 공시체의 일축압축강도 측정 후 일정량의 시료를 무작위로 채취한 후 분쇄하여 XRD 분석을 실시하였다. X선의 회절각도 2θ 값은 10- 70°로 설정하였으며, 그림 6은 염화칼슘을 사용한 공시체의 XRD 분석 결과이다. 그림 6을 분석하면 탄산칼슘의 결정질 중의 하나인 calcite가 포함되어 있음을 알 수 있다.

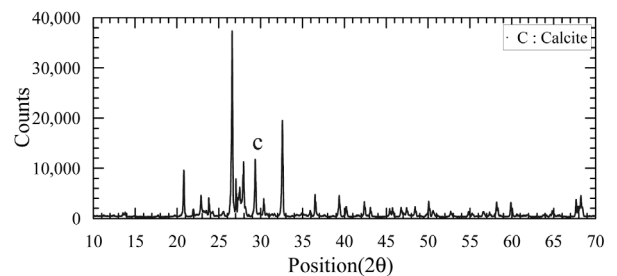
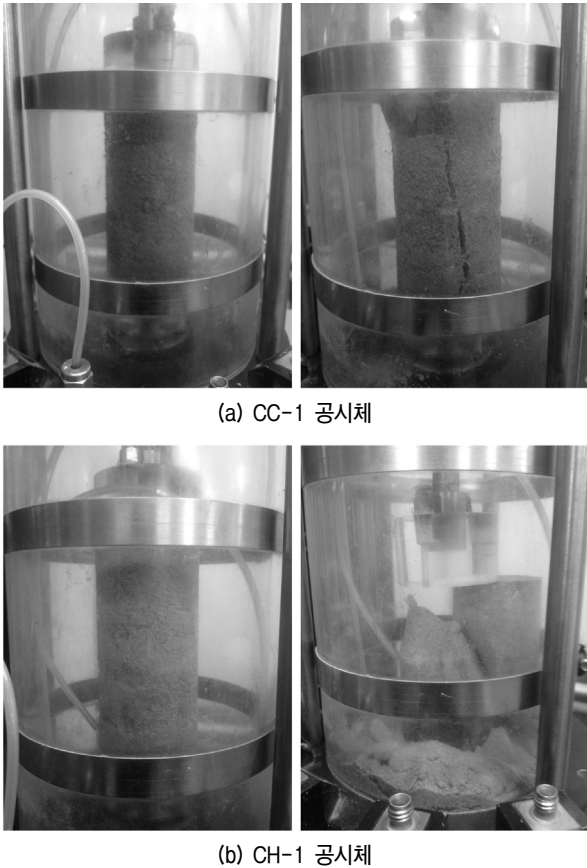


그림 6. 식물추출액으로 고결된 공시체의 XRD 분석 결과

3.3 고결된 모래의 일축압축강도

그림 7은 식물추출액과 칼슘원을 이용하여 모래를 고결시킨 직경 5cm 공시체의 강도실험 전과 후의 모습이



(a) CC-1 공시체

(b) CH-1 공시체

그림 7. 식물추출액으로 고결된 공시체의 파괴 전과 후의 모습

다. 그림 8은 칼슘원으로 염화칼슘과 수산화칼슘을 사용한 공시체의 일축압축시험 결과를 비교하고 있다. 식물추출액을 넣지 않은 CC-0과 CH-0의 일축압축강도는 각각 30kPa와 89kPa로 동일한 칼슘원을 사용한 공시체 중에서 가장 낮은 강도를 보였다. 그 이유는 공시체 제작에 사용한 요소가 분해되지 않아 탄산칼슘이 생성되지 않았기 때문으로 판단된다. 그림 8에서 식물추출액을 넣은 공시체의 경우 칼슘원에 관계없이 요소의 농도가 높을수록 일축압축강도는 증가하는 경향을 보였다. 그림 8(a)에서 칼슘원으로 염화칼슘을 사용한 경우 최대 일축압축강도가 317kPa로 나타났으며, CC-0와 CC-3을 비교하면 탄산칼슘 생성으로 강도가 약 10배 정도 증가한 것으로 나타났다. 그림 8(b)에서 수산화칼슘을 사용한 경우도 요소의 농도가 높을수록 일축압축강도가 증가하는 경향을 보였으며, 최대 일축압축강도는 244kPa를 기록하였다. CH-0와 CH-3을 비교하면 탄산칼슘 생성으로 강도가 약 3배 정도 증가한 것으로 나타났다. 칼슘원으로 염화칼슘을 사용한 경우가 수산화칼슘을 사용한 경우보다 강도 증진 효과가 더 높았다. 이것은 수산화칼슘의 경우 초기 화학반응에서 수분이 빠르게 증발되고 암모니아 가스가 많이 배출되어 공시체를 팽화시킨 결과로 판단된다. 칼슘원으로 수산화칼슘을 사용한 경우 공시체 내 수분이 빠르게 증발하면서 공시체의 색깔도 염화칼슘을 사용한 것보다 훨씬 빠르게 흰색으로 변하였다. 실험 후 측정함 함수비에서도 염화칼슘을 사용한 공시체보다 훨씬 낮게 나타났다. 무엇

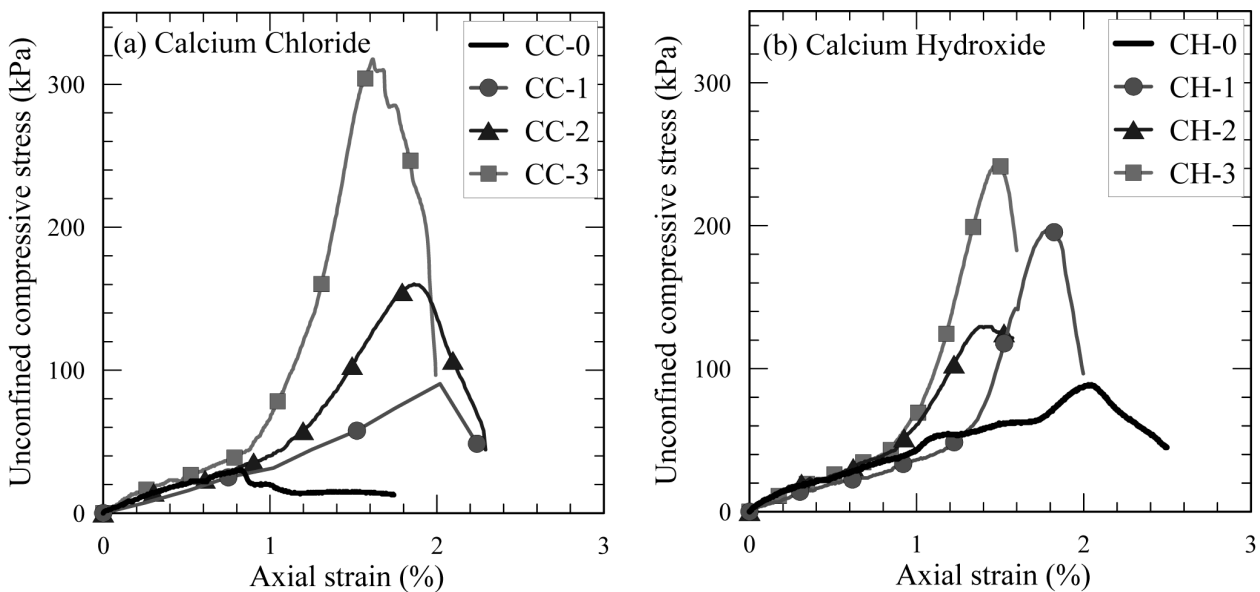


그림 8. 식물추출액으로 고결된 공시체의 일축압축시험 결과

보다도 수산화칼슘의 경우에는 염화칼슘보다 용해도가 상당히 낮아 용액 내 칼슘이온이 적어 탄산이온과 결합하여 생성되는 탄산칼슘의 양이 적었기 때문에 판단된다.

3.4 기존 고결제와 강도 및 경제성 비교

본 연구에서 개발한 고결방식에서 칼슘원으로 염화칼슘을 사용하여 상온에서 3일 동안 양생시킨 공시체의 최대 일축압축강도는 317kPa이며 이 값은 초속경시멘트 4%를 혼합하여 3일 동안 양생시킨 고결모래의 일축압축강도와 유사하였다(박성식 등 2009). 한편 시멘트와 같은 기존 고결제와의 경제성을 비교해 보면, 소형 공시체 제작에 초속경시멘트 4%(12g)를 사용할 경우 비용은 약 8원(25,000원/40kg) 정도이지만 본 연구에서 개발한 고결제는 식물추출액 25cc에 125원(2,500원/500cc), 요소 25g에 19원(750원/1,000g), 염화칼슘 10g에 9원(920원/1,000g)으로 총 153원이 소요되므로 약 19배 정도의 차이가 났다. 하지만 요소와 염화칼슘을 각각 소변과 각종 껍질류로 대체할 경우 그 비용이 거의 소요되지 않을 뿐 아니라 수입용 식물추출액을 사용할 경우 기존 시멘트와의 비용 차이는 약 16배 정도로 감소시킬 수 있을 것이다. 그리고 다양한 식물추출액을 개발하여 단가를 낮추고 시멘트 생산 시 발생하는 이산화탄소 배출금을 고려한다면 식물추출액을 이용한 고결제의 경제성은 충분히 경쟁력 있다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 시멘트를 대신하여 지반을 친환경적으로 고결시킬 수 있는 지반고결제에 대한 연구를 수행하였다. 기존 미생물을 이용하여 지반 내에 탄산칼슘을 석출시켜 친환경적으로 지반을 고결시키는 방식에서 본 연구에서는 미생물을 대신하여 요소를 분해할 수 있는 식물추출액을 이용하였다. 요소의 농도뿐만 아니라 요소에서 분해된 탄산이온과 결합하여 탄산칼슘을 생성시키는 칼슘원으로 염화칼슘과 수산화칼슘을 사용하여 칼슘원에 따른 특징을 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 식물추출액이 요소를 분해하면서 생성된 탄산이온과 공급된 칼슘이온이 결합하면서 생성되는 탄산칼

슘의 석출 여부를 XRD와 SEM 분석으로 확인하였으며, 4일 후 최대 5% 정도의 calcite가 생성되어 모래 고결을 유발하였다.

- (2) 칼슘원에 관계없이 요소의 농도가 높을수록 모래 입자 사이에 생성된 탄산칼슘으로 일축압축강도는 계속 증가하여 최대 317kPa까지 기록하였으며, 이 값은 탄산칼슘이 생성되지 않은 공시체보다 10배 정도 높으며 초속경시멘트 4%를 혼합한 모래의 강도와 유사하였다.
- (3) 염화칼슘을 칼슘원으로 사용한 경우가 수산화칼슘을 칼슘원으로 사용한 경우보다 강도가 더 높게 나타났다으며, 이것은 염화칼슘의 용해도가 수산화칼슘의 용해도보다 더 높아 탄산칼슘이 더 많이 생성된 것이 가장 큰 원인으로 판단되었다.
- (4) 유사한 강도를 가진 고결모래를 만들기 위해 필요한 비용은 초속경시멘트를 사용하는 것보다 식물추출액을 사용할 경우 19배 정도의 비용이 더 소요되었다. 하지만 시멘트 생산 시에 발생하는 이산화탄소 배출금 및 자연환경 훼손 등을 고려하였을 때 경쟁력은 충분히 있다고 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 국토해양기술연구개발사업의 연구비지원(11기술혁신F01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김대현, 김호철, 박경호 (2010), "Bacteria를 이용한 연약한 흙의 고결화 가능성", *한국지반공학회 가을학술발표회 논문집*, pp.379-391.
2. 김선태, 도종남, 조현수, 천병식 (2011), "다당류 친환경 지반개량제를 이용한 지반강도 증대 효과", *한국지반환경공학회논문집*, 제12권 제11호, pp.13-21.
3. 박성식, 김화중, 이준철 (2011), "미생물에 의해 생성된 광물질이 고결모래의 강도에 미치는 영향", *한국지반공학회논문집*, 제27권 5호, pp.75-84.
4. 박성식, 김기영, 최현석, 김창우 (2009), "양생방법에 따른 고결모래의 일축압축강도 특성", *대한토목학회논문집*, 제29권 제5C호, pp.207-215.
5. 안지환, 박찬훈, 김정효, 이종국, 김환 (1996), "고농도 수산화칼슘 수용액으로부터 초미립 경질 탄산칼슘 분말의 합성", *한국결정성장학회지*, 제6권 4호, pp.509-520.
6. 이병호, 김영훈, 천병식 (2010), "실리카졸 약액의 환경영향성 검토 및 내구증진방안", *한국지반환경공학회논문집*, 제11권 제12호, pp.13-18.
7. 천우영, 박성진, 김화중, 김사열 (2008), "미생물의 생체광물형성 작용을 이용한 스마트 콘크리트 개발에 관한 기초 연구", *대한건*

측학회지회연합회 학술발표대회 논문집, pp.379-384.

8. 한현각, 김보미, 김진아 (2008), “탄산칼슘결정 생성에서 온도와 PAA 영향”, *화학공학*, 제46권 제6호, pp.1052-1056.
9. Bruker-AXS (2008), DIFFRAC^{plus} TOPAS: TOPAS 4.2 User Manual, Bruker-AXS GmbH, Karlsruhe, Germany.
10. DeJong, J. T., Fritzes, M. B., and Nüslein, K. (2006), “Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp.1381-1392.
11. Kawasaki, S., Ogata, S., Hiroyoshi, N., Tsunekawa, M., Kaneko, K. and Terajima, R. (2010), “Effect of temperature on precipitation of calcium carbonate using soil microorganisms”, *Journal of Japan Society of engineering Geology*, Vol.51, No.1, pp.10-18.
12. Mitchell, J. K. and Santamarina, J. C. (2005), “Biological Considerations in Geotechnical Engineering”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10), pp.1222-1233.
13. Terajima, R., Shimada, S., Oyama, T., and Kawasaki, S. (2009), “Fundamental study of siliceous biogrout for eco-friendly soil improvement”, *Journal of Japan Society of Civil Engineers C*, Vol.65, No.1, pp.120-130.
14. Van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J. M., van der Star, W. R. L., and van Loosdrecht, M. C. M. (2010), “Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.136, No.12, pp.1721-1728.
15. Whiffin, V. S., van Paassen, L. A., and Harkes, M. P. (2007), “Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique”, *Geomicrobiology Journal*, 24, pp.417-423.

(접수일자 2012. 3. 2, 심사완료일 2012. 3. 26)