

발 간 등 록 번 호

11-1613000-001556-01

해빙기 안전성 확보를 위한 동절기 다짐기법 개발

- 최종보고서 -

2016. 07. 29

단국대학교 산학협력단



제출문

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

이 보고서를 "해빙기 안정성 확보를 위한 동절기 다짐기법 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2016 . 07 . 29

주관연구기관명 : 단국대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 조완제

연구원 : 채덕호

" : 황범식

" : 김영선

" : 이정협

" : 이보영

보고서 요약서

보고서 요약서

과제고유번호	15CTAP-C 078764-02	해 당 단 계 연 구 기 간	2015.08.27.~ 2016.08.26. / 2014.08.14.~ 2016.08.26	단 계 구 분	(해당단계)/ (총 단 계)
연 구 사 업 명	국토교통기술촉진연구사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	해빙기 안정성 확보를 위한 동결기 다짐기법 개발			
	단위과제명	해빙기 안정성 확보를 위한 동결기 다짐기법 개발			
연 구 책 임 자	조완제	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 6 명 내부 : 5 명 외부 : 1 명	총연구비	정부 : 100,000천원 기업 : 천원 계 :100,000 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	단국대학교 산학협력단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	100
본 연구에서는 영하온도에서의 지반재료의 다짐 특성을 파악하기 위해 상온(18℃)과 영하온도(-3℃, -8℃)에서 다짐시험을 수행하였으며, 동결 및 융해를 반복 적용시킨 지반재료의 일축압축시험, 체적변형측정, 불포화특성시험을 통해 동결 및 융해에 따른 해빙기 지반재료의 성능변화를 평가함. 영하온도에서 다짐 시 얼음의 생성으로 인한 다짐효과의 감소를 발견하였으며, 일축압축시험결과 -8℃에서 다짐된 시료의 경우 50%이상의 강도감소를 보임. 또한, 불포화 시험을 통해 동결융해에 따른 흡수력의 감소를 확인하였음. 본 연구에서 실시한 시험결과를 바탕으로 영하온도 -3℃까지는 동결기 다짐시공이 가능하다고 판단되지만, -8℃이하의 온도에서는 다짐효과의 저하가 구조물의 안전성에 영향을 미칠 것으로 판단되어 다짐시공을 실시하기에 부적절하다고 판단됨.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	영하온도, 동결융해, 불포화 지반, 함수특성, 다짐			
	영 어	sub-zero temperature, freezing and thawing, unsaturated soils, soil-water characteristics, compaction			

요약문

요 약 문

I. 제 목

해빙기 안전성 확보를 위한 동절기 다짐기법 개발

II. 연구개발과제 개요(목적, 필요성, 범위 등을 기술)

일반적으로 동절기에는 공사가 진행되지 않는 것으로 알고 있으나, 시공기간 단축 및 이윤 추구 등의 이유로 대다수의 수급업체가 동절기 공사를 시행하고 있다. 하지만 국내 동절기 공사의 경우 동절기 시공에 대한 명확한 기준이 마련되어있지 않으며, 시공 후 현장의 다짐도 판단을 위한 현장시험의 경우 지반이 동결된 상태에서 수행되므로 추후 해빙기에 지반재료가 융해되어 발생할 수 있는 문제점을 예측하는 것이 불가능하다. 따라서 해빙기 사고 예방을 위해 동절기 다짐시공에 따른 다짐특성 및 해빙기 성능변화를 파악할 필요가 있다고 판단된다. 또한 우리나라와 같은 계절 동토지역에서는 동결융해가 반복적으로 적용됨에 따라 지반의 불포화특성의 변화가 있을 것으로 판단되며 사면과 관련한 많은 연구들이 불포화 토질역학 이론을 바탕으로 진행되고 있는 시점에서 지반재료의 동결융해 및 영하온도에서의 불포화 특성을 파악하는 것 역시 중요한 요소라 판단된다. 본 연구에서는 영하온도에서의 지반재료의 다짐 특성을 파악하기 위해 상온(18℃)과 영하온도(-3℃, -8℃)에서 다짐시험을 수행하고, 동결 및 융해를 반복 적용시킨 지반재료의 일축압축시험, 체적변형측정, 불포화특성시험을 통해 동결 및 융해에 따른 해빙기 지반재료의 성능변화를 평가하고자 한다. 또한 이를 바탕으로 해빙기 융해 시 발생할 수 있는 역학적 변화를 최소화 할 수 있는 동절기 다짐기법을 개발하고자 한다.

III. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

연구목표	주요 연구내용 및 수행방법	연구수행결과
영하 온도에서 다짐시공한 지반의 해빙기 특성을 파악을 통한 동	○ 동절기 다짐 특성에 관한 문헌 연구 - 동절기 온도에 따른 다짐 특성에 대한 선행 연구 조사 - 동절기 다짐시공에 대한	○ 동절기 다짐 특성에 관한 문헌 연구 - 동절기 온도에 따른 다짐 특성에 대한 선행 연구 조사 ① Highter 등(1970)은 낮은 온도에서 다짐 시 다짐효과가 감소하는 것을 확인하였으며, 이로 인해 낮은 건조단위중량이 나타남을 확인하였다. ② Lee and Hau(1973)는 낮은 함수비에서 온도가 흙에 미치는 영향이 미미함을 확인하였으며, 온도의 영향을 무시할 수

절기 다 짐시공법 개발	선행 연구 조사 - 동절기 다짐시공에 대한 해외 기준조사 ○ 영하온도(-10도 이상)에 서의 다짐 특성 - 동결 체임버에서 세립분 함유량에 따른 다짐 특성 변화 실험 - 동결온도 -8, -3에서의 온도와 세립분에 따른 다 짐 특성 변화 파악 - 3종류의 풍화토에 대하여	있는 함수비의 범위를 0~7%로 규정하였다. ③ Johnson 등(1962)은 실트질 모래로 온도에 따른 다짐곡선 의 경향을 파악하였다. 온도가 24℃ 에서 -12℃로 낮아짐에 따라 최대건조단위중량 또한 낮아지는 경향을 확인하였으며, 이를 통해 온도가 0℃ 이하로 낮아지게 되면 다짐 효과가 감 소함을 확인할 수 있다. - 동절기 다짐시공에 대한 선행 연구 조사 ① Heiner(1972)은 영하조건에서 온도가 낮아질수록 상대다짐 도가 감소하며, 함수비가 높을수록 상대다짐도가 더 심하게 감소하는 경향을 확인하였다. 이를 통해 영하의 온도에서 다 짐효과가 감소하는 것을 알 수 있었다. ② Haas and Barker(1988)는 함수비가 증가할수록 얼음의 직 경이 크게 형성됨을 확인하였으며, 함수비가 5% 이하일 경우 에는 얼음덩어리의 직경이 비교적 균질하게 나타나지만 함수 비가 5%보다 클 경우에는 얼음덩어리의 직경이 매우 불균질 하게 형성됨을 확인하였다. ③ Hass(1988)은 함수비가 증가할수록 동결온도에서 사질토 의 건조단위중량이 감소함을 확인하였다. 동결 온도에서 높은 함수비로 제작된 시료의 단위중량은 최대건조단위중량의 약 75~80% 수준으로 최소건조단위중량과 근접한 값을 보였다. - 동절기 다짐시공에 대한 해외 기준조사 ① Freitag와 McFadden(1997)에서 발췌한 동절기 건설공사의 기준에 따르면 동절기 성토 시공 시 동결에 덜 민감함 재료를 사용하고 낮은 함수비에서 시공을 실시하며 토사에 얼음덩어 리가 생성되지 않도록 주의해야한다. 또한 해빙기가 시작되면 현장의 계측과 보수를 통해 엄격한 유지관리가 이루어져야한 다. ○ 영하온도(-10도 이상)에서의 다짐 특성 - 동결 체임버에서 세립분 함유량에 따른 다짐 특성 변화 실험 ① 실제 현장조건을 최대한 모사하기 위해 모든 한국건설기술 연구원의 대형 냉동체임버 내에서 진행하였다. 냉동체임버는 -50 ~ 50℃의 온도범위를 제어가능하며 Baker(1976)이 제 안한 동결토 시험 및 저장시 허용온도차를 만족하는 성능을 보유하고 있다. ② 세립분 함량에 따른 다짐특성을 파악하기 위해 주문진 표 준사에 세립분 0, 5, 10, 15%를 중량비로 혼합하여 시험을 수행하였다.
-----------------------------	--	--

	다양한 동결온도에서의 다짐 특성 변화 파악 및 결과 비교 ○ 영하온도(-10도 이상) 다짐 시료의 용해 거동 평가 - 다양한 동결온도에서 다짐으로 제작된 시료의 상온(15도)에서의 용해시 강도 저하 양상 파악(일축압축시험)	- 동결온도 -8, -3도에서의 온도와 세립분에 따른 다짐 특성 변화 파악 ① 동결온도 -8, -3도에서 다짐에너지를 표준 A다짐에서 수정 D다짐으로 약 5배 증가시킬 경우 다짐에너지가 증가함에 따라 최대건조단위중량이 증가하고 최적함수비가 감소하여 다짐곡선이 좌측상부로 이동하는 경향을 볼 수 있었다. ② 동결온도 -8, -3도에서 세립분 함량이 증가할수록 세립분이 간극으로 채워지면서 최대건조단위중량은 증가하였지만 최적함수비의 경향은 파악할 수 없었다. 영하온도에서 생성된 불규칙한 얼음 알갱이들이 흡입자와 같은 거동을 하여 입도분포에 영향을 주었기 때문으로 판단된다. ③ 동결온도 -8, -3도에서 실시한 다짐시험결과를 비교한 결과, 온도가 낮아질수록 흡입자보다 밀도가 낮은 얼음이 간극을 채우면서 최대건조단위중량은 감소하였지만 최적함수비의 경향은 파악할 수 없었다. 이는 생성되는 얼음알갱이의 형상 및 크기나 생성량이 불규칙하기 때문으로 판단된다. - 3종류의 풍화토에 대하여 다양한 동결온도에서의 다짐 특성 변화 파악 및 결과 비교 ① 3종류의 풍화토 고양A, 용인A, 용인B에 대해 다짐시험을 실시한 결과, 3종류의 풍화토 모두 온도가 낮아짐에 따라 최대건조단위중량은 감소하였지만 생성되는 얼음알갱이의 형상 및 크기나 생성량이 불규칙성에 의해 최적함수비의 경향은 파악할 수 없었다. ○ 영하온도(-10도 이상) 다짐 시료의 용해 거동 평가 - 다양한 동결온도에서 다짐으로 제작된 시료의 상온(15도)에서의 용해시 강도 저하 양상 파악(일축압축시험) ① 풍화토(고양 A)의 다짐시험결과를 바탕으로 상대다짐도 95%이상을 획득하는 시료를 성형하여 영하온도 -3, -8℃에서 동결용해 10회 반복 수행 후 일축압축시험을 수행하였다. ② -3℃에서 동결용해과정을 진행한 시료의 경우 강도감소가 약 30%까지 발생하였으나, 강도가 감소하지 않거나 약간 증가한 경우도 발생하였다. 이는 일축압축시험의 불확실성을 고려하였을 때 동결용해가 강도저하에 미치는 영향이 미미하다고 판단된다. ③ -8℃에서 동결용해과정을 진행한 시료의 경우 강도감소가 최대 45%로 강도가 감소하는 경향이 확연하게 나타났다. 이는 용해 시 풍화작용에 의해 세립화가 진행되고, 생성된 세립질의 흡입자들이 동결 시 얼음알갱이들과 뭉치면서 간극이
--	---	---

	○ TDR을 이용한 부동수분과 다짐 특성과의 관계 도출 - TDR을 이용한 영하온도 하에서의 부동수분에 따른 다짐특성 변화 파악 - TDR을 이용한 동절기 다짐성능평가기법 조사 ○ 온도 및 세립분 함유량에 따른 동절기 다짐시공법 개발 - 1차년도 결과를 바탕으로 온도 및 세립분 함유량에 따른 다짐시공법 개발	증가면서 강도의 저하가 발생하는 것으로 판단된다. ○ TDR을 이용한 부동수분과 다짐 특성과의 관계 도출 - TDR을 이용한 영하온도 하에서의 부동수분에 따른 다짐특성 변화 파악 ① -8°C에서의 함빙비가 -3°C에 비해 대체적으로 높은 경향을 보였으며 이는 낮은 온도에 의해 간극수가 더 많이 동결된 것으로 판단된다. ② 세립분 함량에 따른 함빙비의 경향은 발견할 수 없었다. 이는 시료가 동결온도에 노출된 시간에 따라 생성되는 얼음알갱이의 생성양이나 형상 및 크기의 불규칙성 때문인 것으로 판단되며, 시료의 밀도에 따른 영향도 있을 것으로 판단된다. ③ 세립분 함량에 따른 다짐곡선의 평균 함빙비가 낮은 경우 다짐곡선이 경향에 비해 우측상부로 이동한 것으로 측정되었으며, 평균 함빙비가 높은 경우 다짐곡선이 경향에 비해 좌측하부로 이동한 것으로 측정되었다. 이는 다짐시험과정에서 발생하는 시료의 간극구조의 변화나 마찰 등의 원인에 의한 얼음생성의 불규칙성에 의한 것으로 판단된다. - TDR을 이용한 동절기 다짐성능평가기법 조사 ① 문헌조사를 통한 TDR을 이용한 동절기 다짐성능평가기법은 발견할 수 없었으며, 계획된 시험실 수준의 시험을 통해 함빙비 및 얼음알갱이의 불규칙성을 명확하게 증명하는 것은 힘들 것으로 판단된다. ○ 온도 및 세립분 함유량에 따른 동절기 다짐시공법 개발 - 1차년도 결과를 바탕으로 온도 및 세립분 함유량에 따른 다짐시공법 개발 ① 1차년도 결과를 바탕으로 동절기 지반재료의 적합성 평가 항목을 선정하였다. 세립토 보다는 조립토를 사용하며 동상에 민감하지 않아야 한다. 또한 지반재료의 함수비를 7% 이하로 유지하며 육안으로 확인이 가능한 얼음덩어리가 포함되지 않도록 관리하여야 한다. ② 동절기 다짐에 따른 다짐효과의 감소를 고려하였을 때 -3°C의 경우 일부 토목구조물 시공이 가능하나, -8°C이하의 온도에서는 다짐도 확보가 불가능하므로 다짐시공을 피하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. ③ 동결융해에 따른 강도감소를 고려하였을 때 -3°C까지는 동절기 다짐시공이 가능하다고 판단되지만, -8°C이하의 온도에서는 다짐효과의 저하가 구조물의 안전성에 영향을 미칠 것
--	--	---

	○ 개발된 다짐시공법을 통하여 제작된 시료의 해빙기 거동 평가 - 개발된 다짐시공법 제작 시료에 대한 융해 거동 평가(일축압축시험, 체적변형측정)	으로 판단되어 다짐시공을 실시하기에 부적절하다고 판단된다. ○ 개발된 다짐시공법을 통하여 제작된 시료의 해빙기 거동 평가 - 개발된 다짐시공법 제작 시료에 대한 융해 거동 평가(일축압축시험, 체적변형측정) ① 본 연구에서 다짐시공이 가능할 것으로 제안한 -3°C에서 다짐을 실시한 시료의 일축압축시험결과 동결온도 -3°C에서 실시한 동결융해가 강도저하에 미치는 영향이 미미한 것을 확인하였다. ② 본 연구에서 다짐시공이 가능할 것으로 제안한 함수비 7%을 고려한 시료에 대한 체적변형측정결과 동결온도 -3°C과 -8°C 모두에서 동결 시 및 융해 시의 체적변형이 1%이하로 발생하는 것을 확인하였다.
해빙기 지반안정 을 위한 지반 온도 및 동결 융해에 따른 성 토 지반 의 불포 화 특성 파악	○ 영하 온도에 따른 불포화 함수특성곡선 선행연구 분석 - 함수특성곡선 관련 선행연구 분석 - 동결에 따른 함수특성곡선 관련 선행연구 분석	○ 영하 온도에 따른 불포화 함수특성곡선 선행연구 분석 - 함수특성곡선 관련 선행연구 분석 ① 황웅기, 등(2012)은 불포화토에서 흙의 구조적 특성이 불포화 함수특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 조립토인 주문진 표준사와 세립토인 새만금지역에서 채취한 실트에 대한 불포화 함수특성시험을 수행한 결과, 포화체적함수비, 잔류체적함수비 그리고 공기함입치 모두 새만금 실트가 크게 나타나는 것을 확인하였다. ② Miller, 등(2002)은 흙의 소성과 다짐에너지가 함수특성곡선에 작용하는 영향을 파악하기 위해 다짐에너지를 다르게 적용한 3종류의 다짐점토에 대한 함수특성곡선을 획득하였다, 시험결과 소성지수 PI값이 클수록 동일한 흡수력에서 체적함수비가 크게 나타나는 것을 확인하였으며, 시료에 적용한 다짐에너지가 증가할수록 포화함수비는 낮지만 잔류함수비는 높은 것을 확인하였다. - 동결에 따른 함수특성곡선 관련 선행연구 분석 ① 노정현(2008)은 불포화 지반의 동결 시 함수특성 변화를 추정하기 위해 온도변화에 따른 간극구조와 모관응력상태의 변화를 고려한 예측기법을 제안하였다. 그 결과, 동결 시 함수특성곡선이 동일한 흡수력에서 포화도가 큰 것으로 나타났으며 공기함입치와 관련된 매개변수 α와 간극크기분포와 관련된 매개변수 n은 감소하는 것을 확인하였다. ② Azmatch 등(2012)은 불포화토에서의 건조 및 습윤현상이 동결토에서의 동결 및 융해현상과 유사하다는 점을 바탕으로

	○ 영하 온도에 따른 불포화 함수특성 변화 파악 - 동결시료에 대한 함수특성곡선 시험 계획 및 수행 - -8, -3도 시료에 대한 함수특성곡선 시험 계획 및 수행 ○ 동결융해에 대한 불포화 함수특성 변화 파악 - 동결/융해 횟수에 따른 함수특성 곡선 변화 파악 시험 계획 및 수행	Clausius-Clapeyron식을 사용하여 온도를 흡수력으로 변환하는 방법으로 동결도의 함수특성을 평가하는 간접적인 방법을 제안하였다. ○ 영하 온도에 따른 불포화 함수특성 변화 파악 - 동결시료에 대한 함수특성곡선 시험 계획 및 수행 ① 영하온도 상태에서의 함수특성시험을 수행하는 것은 함수특성시험의 특성상 불가능하므로 영하온도에서 실시한 다짐시험의 결과를 바탕으로 다짐된 시료를 통해 동결기에 다짐시공을 실시한 지반을 모사하였다. ② 영하온도에서 다짐을 실시할 경우 얼음알갱이의 생성으로 인해 다짐효과가 감소하여 상대다짐도가 감소하며 이는 성토지반의 밀도의 저하를 의미한다. - -8, -3도 시료에 대한 함수특성곡선 시험 계획 및 수행 ① 낮은 온도에서 다짐을 실시한 시료일수록 포화체적함수비와 함수특성곡선의 기울기가 증가하고 잔류함수비가 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 다짐효과감소에 따른 밀도 감소에 의한 영향으로 판단되며 풍화토와 모래시료 모두 동일한 경향을 나타내었다. ② Fredlund and Xing(1994)의 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델은 3개의 변수를 요약한 결과 두 시료 모두 밀도가 낮아질수록 공기함입값과 관련있는 변수 a는 감소하였으며, 함수특성곡선의 기울기와 관련있는 변수 n, 잔류함수비와 관련있는 변수 m는 증가하는 경향을 나타내었다. ○ 동결융해에 대한 불포화 함수특성 변화 파악 - 동결/융해 횟수에 따른 함수특성 곡선 변화 파악 시험 계획 및 수행 ① 동결융해에 따른 함수특성곡선의 거동을 파악하기 위해 동결융해를 10, 20회 반복시킨 시료에 대해 불포화 함수특성곡선시험을 실시하였으며 동결융해에 의한 영향만을 확인하기 위해 시료는 상온에서 실시한 다짐시험의 결과를 바탕으로 성형한 시료로 동일하게 성형하여 진행하였다. - 동결/융해 횟수에 따른 함수특성 곡선 변화 파악 시험 계획 및 수행 ① 풍화토의 경우 동결융해를 적용함에 따라 공기함입값과 함수특성곡선의 기울기가 감소하고 잔류포화도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 동일한 함수비에서 지반의 전단강도를 증가
--	---	---

	○ 영하 온도에 따른 불포화 강도 특성 변화 파악 - 온도에 따른 불포화 강도 특성 변화 파악(불포화 일축압축시험 수행) ○ 동결융해에 따른 불포화 강도 특성 변화 파악 - 동결/융해 횟수에 따른 불포화 강도 특성 변화 파악(불포화 일축압축시험 수행)	시키는 흡수력이 작아진다는 것을 의미하며, 동결융해가 반복적으로 진행되면서 세립질의 토립자들이 얼음과 뭉쳐져 시료 내의 간극구조가 흙 입자의 비표면적이 감소하는 형태로 변하여 나타난 현상으로 판단된다. ② 풍화토에 동결융해를 실시한 시료의 경우 공기함입값과 관련있는 변수 a, 잔류함수비와 관련있는 변수 m, 함수특성곡선의 기울기와 관련있는 변수 m 모두 감소하는 경향을 보였다. ③ 세립분 15%가 혼합된 모래시료의 경우 동결융해를 적용함에 따라 공기함입값과 잔류포화도가 증가하고 함수특성곡선의 기울기가 감소하는 경향을 보였다. 이는 동일한 흡수력에서 물과 흙입자의 결합력이 더 크다는 것을 의미하며, 동결융해가 반복적으로 작용되면서 발생한 풍화작용에 의해 흙입자의 세립화가 진행되어 나타난 현상으로 판단된다. ④ 세립분 15%가 혼합된 모래시료에 동결융해를 실시한 시료의 경우 공기함입값과 관련있는 변수 a는 증가하였으며 잔류함수비와 관련있는 변수 m은 감소하는 경향을 보였다. 함수특성곡선의 기울기와 관련있는 변수 n의 경향은 찾을 수 없었다. ○ 영하 온도에 따른 불포화 강도 특성 변화 파악 - 온도에 따른 불포화 강도 특성 변화 파악(불포화 일축압축 시험 수행) ① 동결다짐에 의한 다짐효과 감소로 인해 강도와 강성이 감소하는 것을 확인하였다. ② -3℃에서 다짐된 지반을 모사한 풍화토의 경우 강도감소율이 10%가 넘지 않아 -3℃에서의 동결기 다짐에 대한 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단하였으나, -8℃에서 다짐된 지반을 모사한 풍화토의 경우 강도감소율이 약 60%로 강도감소가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. ③ 동결다짐을 모사한 시료의 흡수력이 증가하는 것을 확인하였다. ○ 동결융해에 따른 불포화 강도 특성 변화 파악 - 동결/융해 횟수에 따른 불포화 강도 특성 변화 파악(불포화 일축압축시험 수행) ① 풍화토의 경우 -3℃에서 동결 및 융해과정을 진행한 시료의 경우 강도 감소율이 최대 29.59%까지 발생하였으나, 강도가 22.435% 증가하는 결과를 보이는 경우도 발생하였다. 이는 일축압축시험의 불확실성 및 시험기계의 오차 등에 의한 오차를 고려하였을 때 -3℃에서의 동결 및 융해과정이 강도저
--	--	--

	○ 융해 시 강도 저하 및 함수특성 변화를 고려한 다짐법 개발 - 변화되는 강도 및 함수특성을 고려하여 동결기 최적 다짐법 제시	하에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단하였다. ② -8°C에서 동결 및 융해과정을 진행한 시료의 경우 융해 시 강도감소가 뚜렷하게 나타났으며 동결융해 반복횟수가 증가함에 따라 강도감소가 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 두 시료 모두 강도감소율이 50%를 넘어가는 것을 보아 -8°C이하에서 동결다짐을 실시할 경우 다짐효과가 상당히 감소하며 동결융해에 따른 강도저하가 해빙기 구조물의 안전성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. ③ 함수특성시험에서 측정된 흡수력과 일축압축시험의 흡수력은 시료크기, 흡수력 측정방법의 차이 등에 의해 동일한 값을 보이지는 않지만 -8°C의 경우 초기 흡수력의 감소를 뚜렷하게 확인할 수 있어 동결융해에 따른 흡수력변화의 거동은 일치함을 확인하였다. ○ 융해 시 강도 저하 및 함수특성 변화를 고려한 다짐법 개발 - 변화되는 강도 및 함수특성을 고려하여 동결기 최적 다짐법 제시 ① 풍화토시료의 경우 동결융해를 반복적으로 적용시킴에 따라 동일한 함수비에서 흡수력이 감소하는 경향을 보였다. 지반의 흡수력은 음의 간극수압을 유발하여 지반의 전단강도를 증가시키므로 흡수력의 감소가 뚜렷한 -8°C에서 동결융해가 반복된다면 흡수력의 감소로 인해 지반의 안전성에도 영향을 미칠 것으로 판단된다. ② 불포화 일축압축시험의 결과를 통해 -8°C에서 동결융해를 반복시킨 시료의 경우 강도감소율이 50%이상 발생하는 것을 확인할 수 있으므로 -8°C이하의 온도에서는 다짐시공을 실시하기에 부적절하다고 판단된다. ③ 지반에 수분이 증가하면 흡수력이 감소하면서 전단강도가 감소되므로 눈이나 강우에 의한 추가적인 수분에 대한 대책을 마련하고 시공 후에도 지속적인 유지관리를 통해 문제가 발생되지 않도록 해야 할 것이다.
--	---	--

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

본 연구에서 실시한 실내 다짐시험을 통한 동절기 다짐특성과 영하온도와 동결 및 융해에 따른 불포화 특성을 고려한 해빙기 융해시의 거동평가를 바탕으로 동절기 지반재료 평가를 위한 실내시험체계를 수립하고, 동절기 다짐시공 시 시방서의 기준에 부합하는 시공품질을 획득하기 위한 다짐시공법을 제시하였다. -3°C 에서 동결다짐을 실시할 경우 동결다짐에 의한 시료의 다짐 효과 감소가 5%이하로 일부 토목구조물 시공이 가능할 것으로 판단되며, 동결융해에 따른 다짐 지반의 융해 시 강도와 체적변형에 미치는 영향이 미미하므로 구조물의 안전성확보가 가능할 것으로 판단된다. -8°C 에서 동결다짐을 실시할 경우 다짐효과가 상당히 감소하며 동결융해에 따른 다짐지반의 융해 시 강도저하가 구조물의 안전성에 영향을 미칠 것으로 판단되어 다짐시공을 실시하기에 부적절하다고 판단된다.

V. 연구목표 달성 및 효과

국내에서 아직까지 연구되지 않은 온도에 따른 지반재료의 특성을 이용하여 동절기 공사 시 다짐의 품질관리를 통해 시공의 효율성, 경제성 및 신뢰성을 손쉽게 확보할 수 있는 동절기 공사의 품질관리기준 수립에 도움을 줄 것으로 기대되며 다양한 토목공사에 적용하여 동절기 공사를 가능케 함으로써 공사기간의 단축과 사회적 기회비용의 절감이 가능할 것이라 판단된다. 또한 온도에 대한 지반재료의 특성 이해로 인한 해빙기 시공 사고를 방지할 수 있으며, 구조물의 성능 저하, 도로 및 철도의 해빙기 침하로 인한 균열, 해빙기 사면안정성 악화로 인한 사면 붕괴 등의 인명, 재산상의 피해를 예방할 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 연구성과 활용계획

앞으로 강원지역 개발에 많은 공사가 이루어질 것으로 예상되며 이러한 경우 본 연구에서 제안하는 다짐기법이 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 통일에 대한 전망이 밝아지면서 북한 개발에 대한 대비로 건설 분야에서도 많은 사전 연구가 수행되고 있다. 북한 지역의 동절기는 강원권 보다 길고 추울 것으로 예상되는 만큼 본 연구에서 제안한 동절기 토공 다짐기법의 현장적용성이 확보된다면 북한 개발에 있어서도 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 국외적으로는 남/북극 등 영구 동토 지역의 개발 대한 세계 각국의 관심이 증가하고 있으므로 세계 시장에서 경쟁력을 갖추기 위해 동토 지반의 특성 연구는 반드시 필요하다고 할 수 있다. 본 연구 결과는 신뢰성 있는 동절기 온도에 따른 지반재료의 이해로 인한 국내외 동절기 공사 시 적합한 토공기준 마련의 기본 자료를 제공함으로써 극한지에서의 시공 및 설계 시 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

영문 요약서

SUMMARY

(영문요약문)

Construction activities are thought to be stopped during the winter season, but many construction companies are enforcing construction for the reasons of shortening the period of construction and pursuing profits. Particularly, it does not have a definite standard and field tests for the evaluation of degree of compaction at the frozen temperature. Therefore, it is difficult to predict the potential problems of geotechnical materials compacted at the winter season. It is necessary to understand mechanical properties of soils compacted at sub-zero temperature and performance changes with temperature to prevent possible accidents in the thawing season. Furthermore, in the seasonally frozen ground region such as Korea, freezing and thawing are repeatedly applied on the ground and it is expected to change the mechanical characteristics in the unsaturated state. It is thus important to understanding unsaturated soil characteristics under freezing and thawing condition and sub-zero temperature. Therefore, in this research, the compaction tests on sandy materials with various fine contents and domestic weathering soil were conducted under various temperature at 18°C, -3°C and -8°C. In addition, the unconfined compression test, volumetric strain measurements and unsaturated soil characteristics tests were conducted with various freezing and thawing cycles to evaluate the performance of the geotechnical material throughout the years. Based on the test results, a compaction technique was newly developed to minimize the mechanical changes occurred during the thawing.

Based on the compaction test results at the sub-zero temperatures, due to the reduction of the compaction effect caused by the development of the ice, it was confirmed that the maximum dry unit weight of the soil decreased. It can be implied that it is difficult to obtain a relative degree of compaction in accordance with the specification at sub-zero temperature and compaction energy should be increased to obtain proper one. Based on the unconfined compression test results, since the reduction of the strength and change in volumetric strain between the freezing and thawing temperature obtained from the sample compacted at -3°C are negligible, earthwork at this temperature can be performed. On the other hand, in the case of the test results at -8°C, since the strength reduction rate of the samples presents distinctly by 50% compared to the room temperature ones, the structural stability can be affected by the reduction of the strength. Based on the unsaturated soil characteristics test results, the weathered soil shows that the suction force decreases with increasing the number of freezing and thawing cycles for all water contents and the suction force applied to the freezing and thawing at -8°C presents more distinct change than tests at -3°C

Since the suction force is increasing shear strength by making negative pore pressure,

the reduction of suction caused by repeated freezing and thawing cycles at -8°C can severely affect the stability of the superstructure. Based on the all the test results presented in this research, the suitability of ground materials for construction in winter season is evaluated and the compaction guidelines are proposed. The coarse grained soils are the most suitable ground material for construction in winter season and the water contents of the ground material should be kept under 7% to minimize influence of frost heave. Based on the experimental research presented herein, it can be concluded that the earthwork can be performed in the winter season where the temperature is greater than -3°C but the earthwork should not be performed at the temperature lower than -8°C .

Due to the guidelines presented in this research was made on the basis of the results obtained from laboratory test, it was not taken into account the uncertain conditions of the field. The manual should be adjusted prior to the direct application to the field based on the model or field verification.

CONTENTS

Chapter 1. Overview of the research	16
Section 1. The purpose and necessity of the research and development	16
Section 2. Research contents and range	17
Section 3. Current technique situation of related field at home and abroad	17
Section 4. Position occupied by research results in the related field	18
Chapter 2. Research information and evaluation	19
Section 1. Previous research on the compaction properties in winter season	19
Section 2. Previous research on the unsaturated soils properties at sub-zero temperature	33
Section 3. Research execution process and contents	48
Chapter 3. The final research results and application results	89
Section 1. Major results of the research	89
Section 2. Verification of the results	92
Chapter 4. Utilization of the research and necessity for further study	96
Section 1. Utilization and benefit of the research results	96
Section 2. necessity for further study	97
Chapter 5. Reference	98

목차

목 차

제1장 연구개발과제 개요	16
1절 연구개발의 목적 및 필요성	16
2절 연구내용 및 범위	17
3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황	17
4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치	18
제2장 연구개발 수행내용 및 결과	19
1절 동절기 다짐특성에 관한 선행연구 분석	19
2절 영하온도에 따른 불포화함수특성에 관한 선행연구 분석	33
3절 연구수행과정 및 내용	48
제3장 최종 연구성과 및 적용실적	89
1절 주요연구 성과	89
2절 연구 성과 검증	92
제4장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	96
1절 연구성과의 활용방안 및 기대효과	96
2절 추가연구의 필요성	97
제5장 참고문헌	98

제1장 연구개발과제 개요

1절 연구개발의 목적 및 필요성

우리나라는 사계절이 뚜렷하며 여름에는 고온 다습하고 겨울에는 한랭한 기후를 보이고 있다. 최근에는 지구온난화와 같은 기후변화로 인하여 최근 5년 동안 겨울이 길어지고 기온이 더 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 이유로 건설분야에서도 동절기에 수행되는 과업들이 증가하고 있는 추세이다. 동절기 토공의 경우 일반적으로 공사가 진행되지 않는 것으로 알고 있으나, 시공 기간 단축에 의한 이윤 추구 및 동절기 공사 미시행 시 기능공 이탈 등으로 인하여 효율적인 공사관리가 곤란하다는 이유로 대다수 수급업체가 동절기에 공사를 시행하고 있다. 또한, 2018년에 있을 평창 동계올림픽의 경우 8개의 설상 경기장과 5개의 빙상 경기장을 신설 및 보완하는데 7000억 원 정도의 금액을 책정하고 현재 공사를 진행 중에 있다. 이러한 시설은 2016년 말 모든 시설의 완공을 목표로 하고 있기 때문에 동절기 공사가 불가피할 것이며, 또한 개최 전까지 어떠한 문제도 생기지 않도록 만전을 기해야 할 것이다. 평창 동계올림픽 이후에도 강원권 개발로 인하여 많은 공사들이 발주될 것으로 예상되며, 추후에 있을 남·북통일로 인한 북한의 개발을 위해서도 동절기 공사에 대한 문제점을 파악하고 이에 대한 대책을 마련함으로써 국가차원의 능동적인 대처가 필요하다고 판단된다.

국내의 경우 동절기 시공에 대한 명확한 기준이 마련되어 있지 않으며 현장에서의 간단한 지침을 통해서만 관리되고 있는 실정이다. 이에 따라 동절기 지반재료의 특성에 대한 이해가 부족한 상태에서 시행되고 있는 동절기 시공의 증가로 인한 해빙기 중 현장에서 사면붕괴 등으로 인한 인명 및 재산피해도 증가하고 있다. 안전보건공단의 해빙기 건설현장 안전보건 가이드라인에 따르면 2015년 2월부터 4월까지 해빙기 중 발생한 재해자는 5000명이 넘으며 이러한 재해 수준은 단순한 동절기 기온의 저하로 인한 품질관리의 미숙으로 판단하기에는 높은 수준으로 판단된다. 따라서 동절기 지반의 동결 정도에 따른 다짐특성을 파악하고, 온도 및 지반재료에 대한 적절한 기준을 수립하는 것이 동절기 사고 예방을 위해 반드시 필요하다고 판단된다. 또한 사면과 관련한 많은 연구들이 불포화 토질역학 이론을 바탕으로 진행되고 있는 시점에서 지반재료의 동결·융해 및 영하에서의 온도와 관련한 함수특성 및 불포화 강도의 변화를 파악하는 것 또한 해빙기 지반의 안정성 파악을 위해서는 중요한 요소라 판단된다.

2절 연구내용 및 범위

해빙기 안정성 확보를 위한 동절기 다짐기법의 개발을 위해서는 흙의 다짐 특성과 동절기 지반재료의 특성 및 동절기 다짐특성에 대해 파악할 필요가 있다. 동절기 다짐의 경우, 지반이 어느 정도 동결된 상태에서 다짐이 이루어지므로, 융해가 될 경우 상온에서 다져서 동결 및 융해를 경험하는 지반상태와는 다른 공학적인 경향을 보일 것으로 판단된다. 이와 더불어, 최근의 사면 설계에서는 불포화 토질역학 이론을 접목하여 지반의 흡수력을 고려한 사면 설계를 많이 실시하고 있으며, 지반의 흡수력 또한 해빙기 건설사고와 무관하지 않을 것으로 예상되며 동결 및 융해가 지반의 흡수력 변화에 미치는 영향이 상당할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국내외의 동절기 다짐시공에 대한 기준을 파악하고 영하온도에서의 지반재료의 다짐 특성을 파악하기 위해 상온(18℃)과 영하온도(-3℃, -8℃)에서 다짐시험을 수행하였으며, 동결 및 융해를 반복 적용시킨 지반재료의 일축압축시험과 체적변형측정을 통해 동결 및 융해에 따른 해빙기 지반재료의 성능변화를 평가하였다. 또한 불포화 함수특성시험과 불포화 일축압축시험을 통해 영하온도 및 동결·융해가 지반의 흡수력 변화 및 불포화 특성에 미치는 영향을 파악하였다. 이를 바탕으로 최저 -8℃ 온도까지의 지반재료의 다짐특성을 파악하고 해빙기 융해 시 영향을 최소화 할 수 있는 다짐 기법 개발과 영하 온도에서 다짐 시공한 지반의 융해 시 특성 파악 및 지반온도 및 동결·융해에 따른 성토 지반의 불포화 특성 변화를 파악하여 이를 반영한 해빙기 융해 시 발생될 수 있는 역학적 변화를 최소화 할 수 있는 동절기 다짐기법을 개발하고자 하였다.

3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

본 연구와 관련된 최근 연구 동향을 살펴보면, 불포화 특성을 고려한 사면 안정 및 소수성(hydrophobic) 지반재료와 같은 새로운 지반 재료의 동결 및 다짐 특성에 관한 연구는 있으나, 본 연구에서 수행한 바와 같이 동절기 영하 온도에 따른 다짐특성 및 불포화 특성 변화에 관한 연구는 과거에 수행된 적이 없으며, 이와 유사한 과제도 수행된 적이 없는 것으로 나타났다. 현재 국내 동절기 공사는 건설안전본부의 동절기공사 시행지침에 따라 동해의 우려가 있는 공종의 경우 가급적 공사를 지양해야 하며, 공정상 불가피한 경우 세부추진계획을 수립하여 발주부서 및 감리원의 승인 하에 시행하도록 하고 있다. 토공사의 경우 불량토, 동결토, 결빙덩어리 및 빙설을 포함한 재료는 사용하지 않도록 하며 가배수로를 설치하여 노면의 결빙을 방지해야 한다는 정도의 지침만 있을 뿐 명확한 기준이 없는 실정이다. 토공에서 상당부분을 차지하고 있는 다짐의 경우 70~80년대에 많은 연구들이 이루어졌으나(김일현, 1979; 박준수, 1981), 다른 지반공학 분야와는 달리 설계 및 시공기술이 과거의 기술을 그대로 답습하고 있으며, 동절기 다짐의 경우 기온과 무관하게 진행되어 해빙기 안전사고의 위험성을 증가시키고 있다. 국외의 경우 보다 구체적인 지침을 제시하고 있으나(Freitag and McFadden, 1997), 국내 지반환경을 고려하지 못할 뿐만 아니라 현장 검증 또한 이루어지지 않았기 때문에 이와 관련된 연구들이 필요한 실정이다.

4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

다짐이라는 주제는 지반공학 분야에서 혁신적인 주제는 아니지만, 대다수의 건설공사에서 가장 빈번히 수행되는 분야 중 하나이다. 다짐과 관련된 대부분의 연구들이 80-90년대에 이루어져 기본적인 이론의 정립 및 다양한 현장 적용에 관하여 검증이 이루어졌으며(한병태 외 1명, 1984; 조성정, 1987), 그 후에는 새로운 다짐도 평가기법의 개발과 같은 지반조사 기법 및 장비들의 개발 및 검증에 대한 연구들이 간간히 이루어졌다. 동결과 관련한 다짐 연구의 대부분은 도로 하부 지반의 동결로 인한 융기를 방지하기 위한 동상방지층 관련 연구들이었고(권기철, 2003; 최정호 외 1명, 2010), 본 연구에서 수행된 융해 시의 문제점은 인지하지 못하고 있다. 동절기 다짐에 관한 연구는 전무한 상황에서 해빙기 사고의 대부분이 지반의 융해로 인한 것으로 보았을 때, 기존의 정립된 다짐이론을 온도에 맞추어 확장할 필요가 있었으며, 이러한 기존 이론의 확장에서 최근 사면분야에서 필요성이 대두되고 있는 불포화 토질역학 이론을 접목하여 동결 지반의 융해 시 거동 평가를 수행한 점은 의미가 있다고 생각된다. 융해 시 지반의 안정성 문제는 단순한 체적 변화에 의한 것이 아닌 흡수력의 변화 때문인 것으로 판단되며, 이를 반영한 다짐 기법을 제시할 경우 그 활용성이 높을 것으로 판단된다. 또한 기존의 불포화 토질역학 관련 연구에서도 영하 온도에 대한 함수특성 및 강도 특성에 대한 연구는 수행된 바가 없었기 때문에 앞으로 관련 분야의 연구자들에게도 좋은 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 매년 동절기 공사 중지와 관련된 시공기간 연장에 의한 비용, 공사 중지에 의한 기능공 이탈 등을 고려할 때, 적합한 동절기 다짐 시공법 및 지침의 제시로 인한 경제적인 이득은 상당히 클 것으로 판단된다.

본 연구는 실험실 수준에서의 성능평가만 수행되었으며, 추후 유사환경 및 현장적용 수준의 연구를 거친다면 해빙기 건설지침 개정 시에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 영구동토지역에서의 지중매설관 건설과 같은 해외 영구동토 지역에 적용할 경우 국제협력을 통한 추가적인 국익창출 효과가 있을 것으로 판단된다.

제2장 연구개발 수행내용 및 결과

1절 동절기 다짐특성에 관한 선행연구 분석

해빙기 안정성 확보를 위한 동절기 다짐기법의 개발을 위해 흙의 다짐 특성과 동절기 지반재료의 특성 및 동절기 다짐특성에 대해 파악할 필요가 있다. 흙의 다짐에 관한 연구는 이미 많은 연구자들에 의해 다양한 범위와 주제로 진행되어 왔다. 본 보고서에서는 모든 범위의 연구내용을 다루지는 않지만 동절기 다짐특성을 파악하기에 적합한 연구들에 대해 몇 가지 정리하였다.

1) 흙의 다짐 특성

다짐이란 흙에 동적 에너지를 가하여 간극에 있는 공기를 배출시키면 빈 간극에 토립자가 채워지면서 흙을 조밀한 상태로 만들어 결과적으로 건조단위중량을 증대시키는 작업이다. 흙의 건조단위중량은 함수비에 따라 달라진다. 흙이 건조한 상태에 있을 경우 흙 입자간의 이동에 대한 저항이 발생하기 때문에 잘 다져지지 않는다. 반면 흙에 수분을 가하면 물이 윤활제 역할을 하여 흙 입자의 이동을 쉽게 하므로 다짐이 잘되고 결과적으로 더 큰 건조단위중량을 얻게 된다. 하지만 일정 이상의 물이 첨가되면 흙 입자가 차지해야할 간극에 흙 입자 보다 비중이 작은 물이 채워지면서 건조단위중량이 감소하기 시작한다(Johnson and Sallberg, 1960). 그림 1은 함수비가 증가함에 따라 단위중량이 변화하는 관계를 나타낸 그림이다. 흙에 적정량의 수분이 가해져 다짐이 가장 잘 되었을 때 건조단위중량이 최대치에 도달하게 되고 이를 최대건조단위중량이라 한다. 또한 흙이 최대건조단위중량으로 다져졌을 때의 함수비를 최적함수비라 한다. 즉 흙을 최적함수비 상태에서 다질 경우 가장 조밀한 상태가 되며 건조단위중량은 최대가 된다.

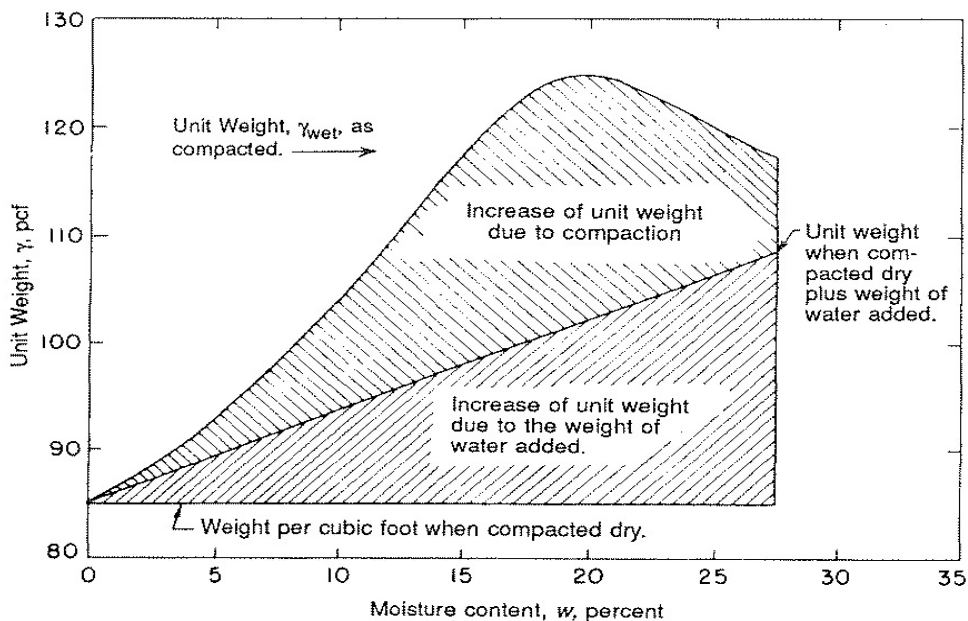


그림 1 함수비의 증가에 따른 단위중량의 변화 (Johnson and Sallberg, 1960)

(1) Proctor 이론

Proctor(1988)는 간극 속의 수분이 다짐된 흙의 건조단위중량에 미치는 영향에 대해 모세관력(capillary force)과 흙 입자의 윤활작용으로 규명하였다. 불포화된 흙에서 수분은 표면장력의 영향으로 제자리에 묶여있게 된다. 흙 입자에 형성된 수분막이 장력으로 연결되어 모세관력을 형성하고, 이 모세관력에 의해 흙 입자 사이에 높은 마찰저항이 발생하여 다짐에 저항하게 된다. 여기서 수분을 추가적으로 첨가해줄 경우 모세관력이 저하되면서 마찰저항이 감소하여 흙 입자의 이동이 좀 더 자유로워지게 된다. 즉 수분에 의해 흙 입자에 윤활작용이 발생함과 동시에 모세관력이 감소되어 마찰저항을 감소시키고 흙의 다짐효과를 증가시키게 되는 것이다.

(2) 흙의 다짐에 영향을 미치는 인자

함수비 외에 다짐에 영향을 미치는 요소에는 일반적으로 시험자의 숙련도, 다짐의 규모 및 다짐방법, 시험 장비, 흙의 특성, 시험 온도 등이 있다(Johnson and Sallberg, 1962). 표준시험방법(ASTM, AASHTO, KS F)을 준수한 시험을 실시하여 다짐에 영향을 미치는 인자들을 규정하고 이를 각각 다른 조건을 적용하여 수행한 시험 결과를 통해 각 인자가 다짐 결과에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 다짐에너지, 흙의 종류 및 입도분포, 시험온도가 이러한 범주에 속하며 그에 따른 다짐특성은 아래와 같다.

① 다짐에너지에 따른 다짐특성

다짐에너지는 다져진 흙 단위부피당 가해진 에너지를 의미하며, 다짐에너지의 크기를 다르게 하면 상이한 다짐곡선이 얻어진다. 즉, 같은 흙일지라도 다짐에너지에 따라 최대건조단위중량과 최적함수비가 변화한다(Johnson and Sallberg, 1962). 램머가 흙을 다질 때의 운동에너지와 램머를 정해진 높이만큼 뽑아 올렸을 때의 위치에너지가 같으므로, 흙에 가해지는 다짐에너지는 식 1로 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{Wh N_b N_l}{V} \quad \text{식 1}$$

여기서, E : 다짐에너지 ($\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$)

V : 몰드의 부피 (cm^3)

W : 램머의 무게 (kg)

h : 램머의 낙하거리 (cm)

N_b : 매 층 당 다짐횟수

N_l : 다짐 층수

그림 2는 동일한 시료와 조건하에서 다짐에너지를 증가시켰을 때 다짐곡선이 변화하는 관계를 나타낸 그림이다. 각 층당 타격횟수를 증가하여 다짐에너지를 증가시킬수록 다짐곡선이 좌측 상부로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 다짐에너지가 증가함에 따라 최대건조단위중량은 증가하고 최적함수비는 감소하게 된다. 다짐곡선의 꼭짓점들을 연결한 선을 최적함수비선(line of optimums)이라 하며, 어떠한 크기의 에너지로 다지더라도 다짐곡선의 꼭짓점은 최적함수비선 상에 있을 것으로 예상할 수 있다.

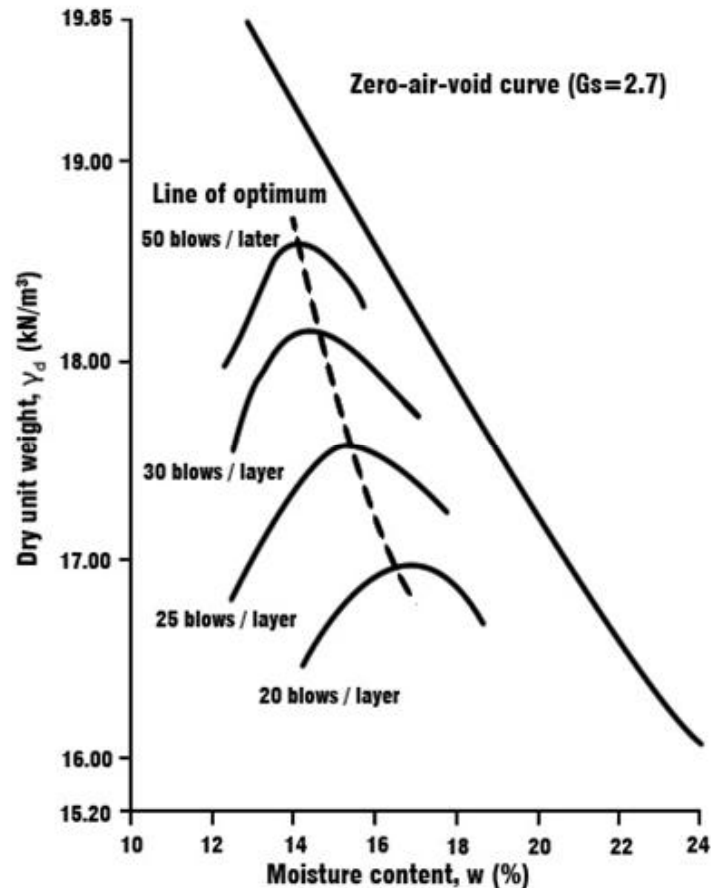


그림 2 다짐에너지의 크기가 다짐에 미치는 영향 (Braja M. Das, 2005)

② 흙의 종류 및 입도분포에 따른 다짐특성

다짐 성과를 결정하는 가장 중요한 요소는 흙의 종류이다. 입도분포, 입자모양, 비중, 광물의 종류와 양은 최대건조단위중량과 최적함수비에 큰 영향을 미친다. 그림 3은 흙의 종류에 따른 다짐 곡선의 형상을 나타내며, 흙의 종류에 따라 다짐곡선의 위치와 형상이 상이하게 나타남을 확인할 수 있다. 균등입경인 경우를 제외한 일반적인 경우 조립토(gravel, sand)가 세립토(silt, clay)에 비해 최대건조단위중량은 크고 최적함수비는 적게 나타난다. 입도분포에 따른 다짐특성의 경우 입도분포가 양호한 경우(GW, SW)에 최대건조단위중량은 크고 최적함수비는 적게 나타나며, 입도분포가 나쁜 경우(GP, SP)는 다짐이 잘 되지 않아 최대건조단위중량은 적고 최적함수비는 크게 나타난다.

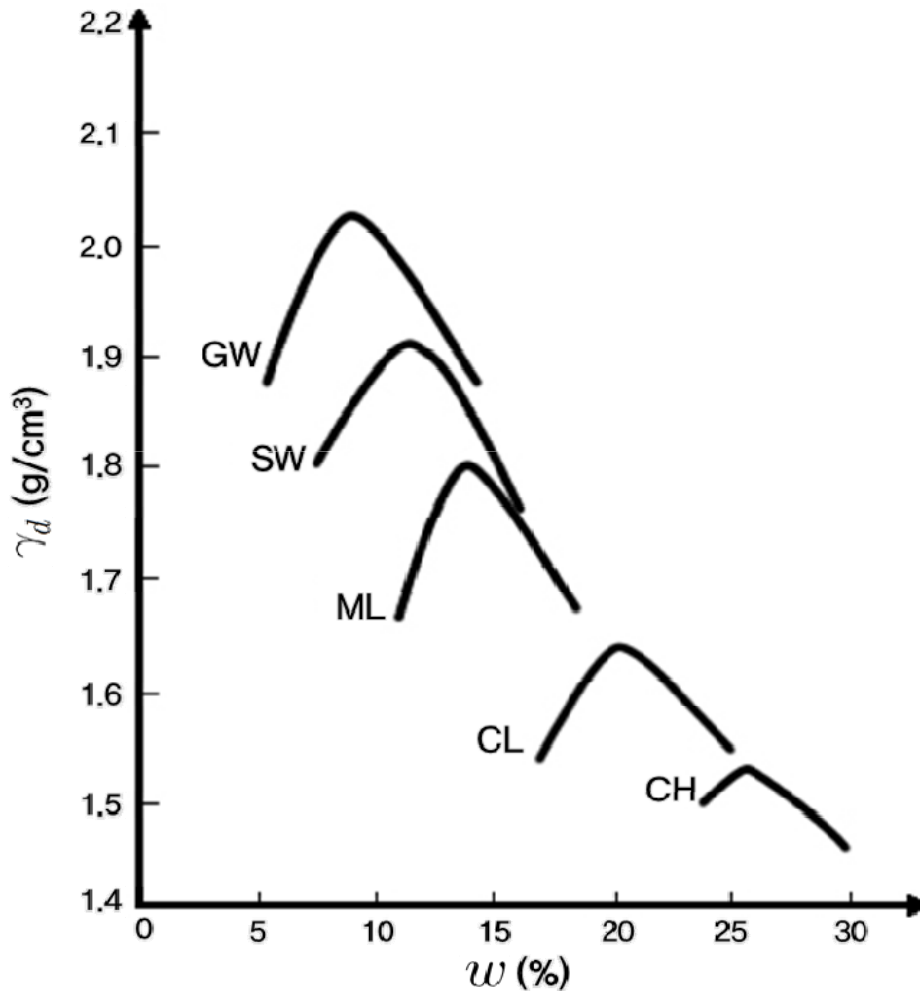


그림 3 흙의 종류에 따른 다짐 특성 (백영식, 2007)

③ 온도에 따른 다짐 특성

Hightner 등(1970)은 낮은 온도에서 다짐 시 다짐효과가 감소하는 것을 확인하였으며, 이로 인해 낮은 건조단위중량이 나타남을 확인하였다. 또한 영하의 현장에서 다짐 시공을 할지라도 동결되지 않은 흙을 사용할 경우는 상온에서의 다짐 효과와 같은 효과로 다짐할 수 있음을 증명하였다. 또한 Lee and Hau(1973)는 불포화토에서 함수비와 온도와의 관계에 대해 연구하였다. 이 연구는 낮은 함수비에서는 온도가 흙에 미치는 영향이 미미함을 확인하였으며, 온도의 영향을 무시할 수 있는 함수비의 범위를 0~7%로 규정하였다. 흙이 최적함수비에 가까워질수록 다짐곡선은 온도의 영향을 많이 받게 되고, 다짐곡선의 습윤측에서는 항상 다짐효과가 감소함을 확인하였다. Johnson 등(1962)은 실트질 모래로 온도에 따른 다짐곡선의 경향을 파악하였으며 그 결과는 그림 4와 같다. 온도가 74°F(24°C) 에서 10°F(-12°C)로 낮아짐에 따라 최대건조단위중량 또한 낮아지는 경향을 나타내었으며 이를 통해 온도가 0°C 이하로 낮아지게 되면 다짐 효과가 감소함을 확인할 수 있다.

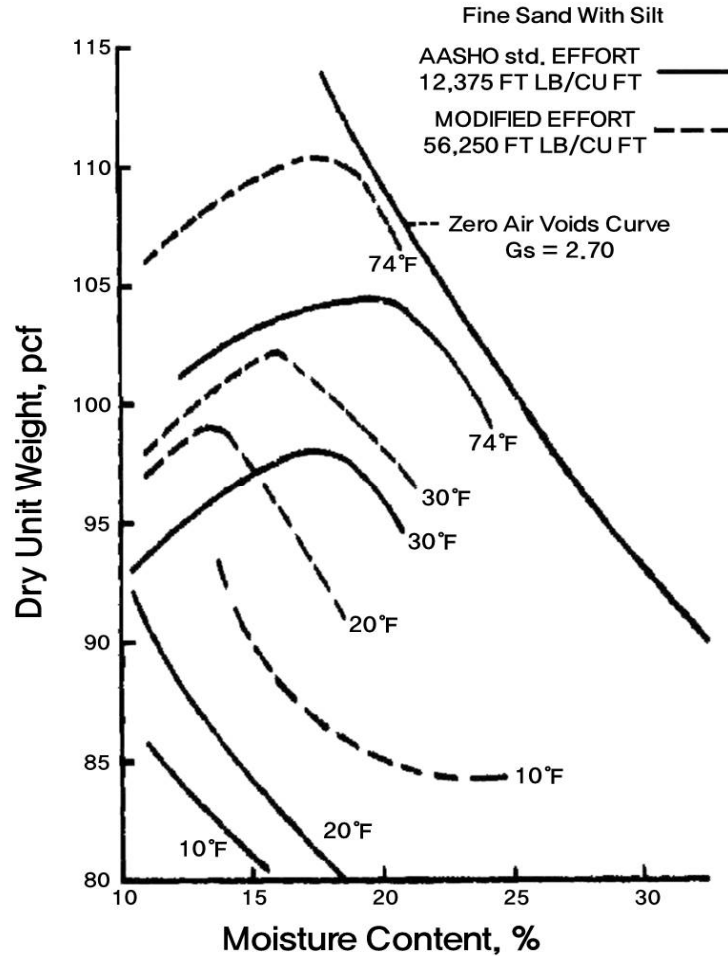


그림 4 실트질 모래의 동결온도에서 다짐 효과 (Johnson and Sallberg, 1962)

2) 동결온도에서 지반재료의 특성

흙은 일반적으로 토립자, 물, 공기의 3상 구조를 가지는 것으로 알려져 있다. 하지만 지반이 동결되면 간극 속의 물이 얼음으로 동결되면서 흙은 토립자, 물, 공기, 얼음의 4상 구조를 나타내게 된다. 그림 5는 비동결토와 동결토의 구조를 나타낸 그림이며, 그림 6은 Ting(1981)에 의해 제안된 동결지반의 개념적인 2차원 구조를 나타낸 그림이다. 낮은 온도에 의해 지반이 동결되면 간극사이의 수분이 작은 얼음알갱이의 형태로 생성되면서 간극을 채우게 된다(Anderson and Morgenstern, 1973). 이 때, 토립자와 얼음간의 경계 및 토립자들 사이의 경계면에는 일정한 온도까지 얼지 않고 남아있는 부동수분이 존재하게 된다. 부동수분의 양은 흙의 비표면적 및 입자의 배열상태, 온도 등에 따라서 달라지는 것으로 알려져 있으며(Hivon and Sego, 1995), 부동수분이 많고 적음에 따라 동결토를 구성하는 얼음의 형태는 작은 얼음알갱이로 존재하거나 토립자의 표면을 연결시켜 큰 얼음 덩어리를 형성하기도 한다. 이러한 얼음 알갱이들의 영향으로 인해 동결된 지반은 일반적인 비동결 지반과는 다른 역학적 특성을 나타내게 된다. 토립자와 얼음 사이의 밀착관계가 변화함에 따라 동결토의 물리적 거동 특성이 달라지므로 이를 파악하기 위해 영하의 온도에서도 얼지 않는 부동수분을 측정하는 것은 매우 중요하다.

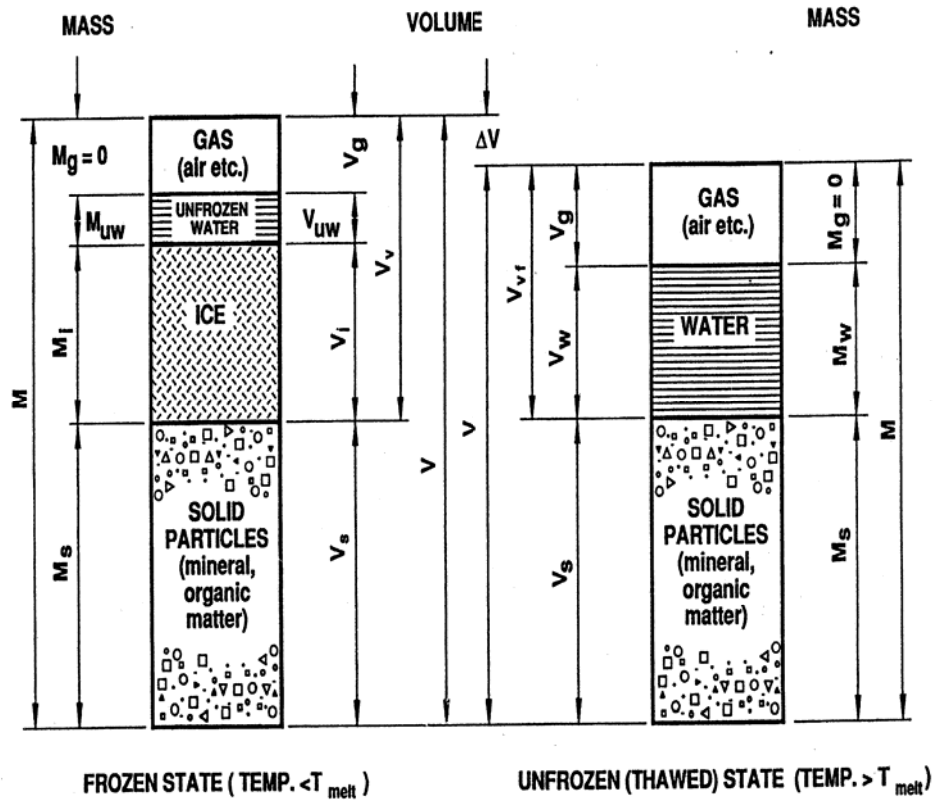


그림 5 동결토와 비동결토의 구조 (Andersland, O. B. and Ladanyi, B, 2004)

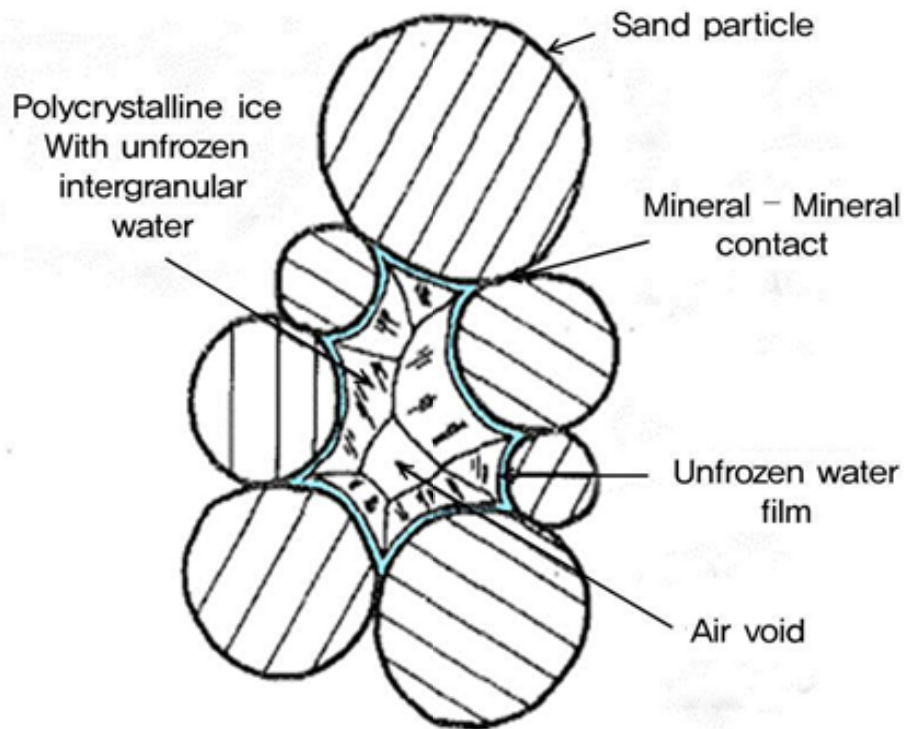


그림 6 동결된 지반의 개념적인 2차원 구조 (Ting, 1981)

그림 7은 동결 지반에서 물과 얼음의 냉각곡선을 나타낸 그림이다. 공극 속의 수분은 초기에 온도가 T_{sc} 까지 떨어지더라도 동결되지 않고 과냉각수의 형태로 준안정 평형상태를 유지하고 있게 된다. 수분의 준안정 평형상태는 순간적인 얼음결정 핵의 생성으로 무너지게 되고 이로 인해 자유수의 동결이 시작되게 된다. 그 과정에서 방출되는 잠열로 동결시작온도는 0°C 에 근접한 T_f 로 상승하게 되며, 지반의 온도가 감소함에 따라 잠열의 방출량은 동결되는 수분의 양에 비례하여 서서히 감소하게 된다. 지반의 온도가 약 -70°C 정도인 T_e 에 도달하게 되면서 대부분의 수분은 동결되게 되고 잠열의 방출로 인한 효과도 사라지게 된다(Andersland and Ladanyi, 2004).

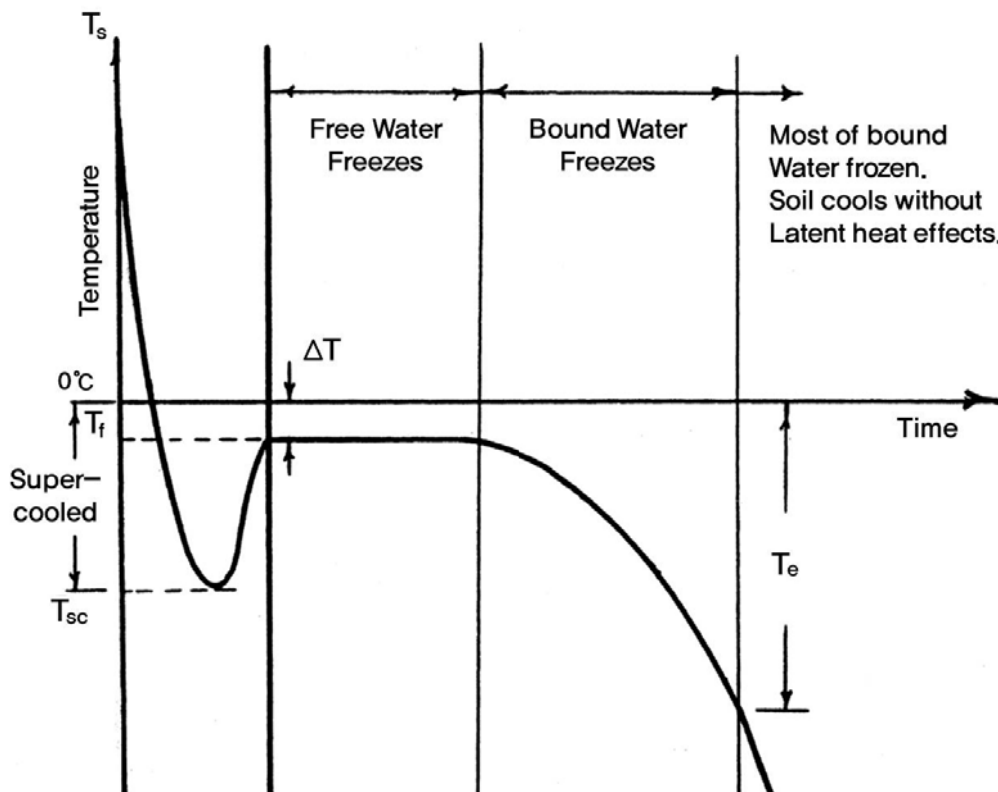


그림 7 흙에서 물과 얼음의 냉각곡선 (Andersland and Ladanyi, 2004)

Andersland and Ladanyi(2004)는 동결지반에서 생성되는 얼음의 양을 함빙비로 정의하였으며 식 2와 같이 나타내었다.

$$i_r = \frac{M_i}{M_w} = \frac{w - w_u}{w} \quad \text{식 2}$$

여기서, M_i 는 얼음의 총 중량, M_w 는 물의 총 중량, w_u 는 부동수분의 함수비를 말한다. 함수비가 0%인 경우 지반에 얼음은 존재하지 않으며 입자간의 접촉면만 존재하게 된다. 함빙비가 증가함에 따라 토립자 표면을 따라 부분적으로 얼음 알갱이들이 생성되고, 함빙비가 10%를 넘어서면 토립자 표면에서 생성된 얼음알갱이들이 연결되면서 얼음 주위의 간극을 채우고 토립자

와 함께 하나의 큰 덩어리의 형태로 성장한다(Wilbur M. 등, 1978). 이렇게 형성된 얼음덩어리들은 하나의 입자로 거동하기 때문에 동결지반의 역학적 특성은 비동결 지반에서의 역학적 특성과는 다른 특성을 나타낼 것으로 판단된다. 그림 8은 Wibur M. 등(1978)이 제안한 함빙비에 따른 간극속의 얼음 형성 과정에 대해 나타낸 그림이다.

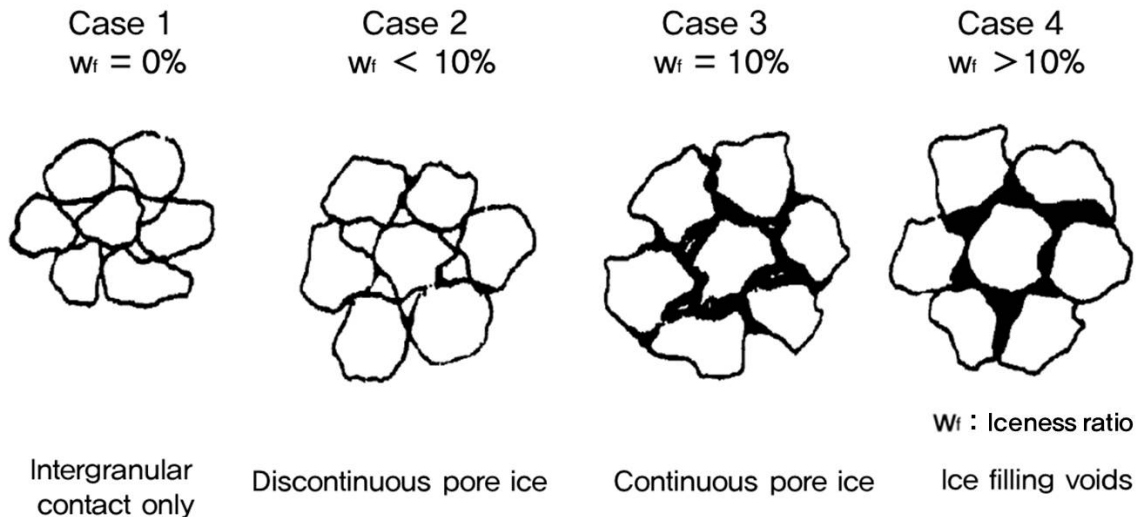


그림 8 함빙비에 따른 간극속의 얼음 형성 과정 (Wilbur M. 등, 1978)

3) 동결기 다짐시공의 특성 파악

동결기 영하의 온도에서 다짐 시 가장 주의할 사항은 시공 후에 지반이 상대적으로 낮은 상대 다짐도를 나타낸다는 점이다. 이는 동일한 다짐에너지를 적용할 때 동결기의 다짐시공에서의 지반의 건조단위중량이 낮게 나타나며, 토립자가 차지했어야 할 간극에 얼음알갱이들이 생성되었다는 것을 의미한다. 그림 9는 조립토의 온도와 함수비의 변화에 따른 상대다짐도의 경향을 보여주는 그림이다(Heiner, 1972). 영하조건에서 온도가 낮아질수록 상대다짐도가 감소하며, 함수비가 높을수록 상대다짐도가 더 심하게 감소하는 경향을 나타냈다. 이를 통해 영하의 온도에서 다짐효과가 감소하는 것을 알 수 있었으며, 감소효과는 온도가 낮거나 함수비가 높을수록 더 크게 나타났다.

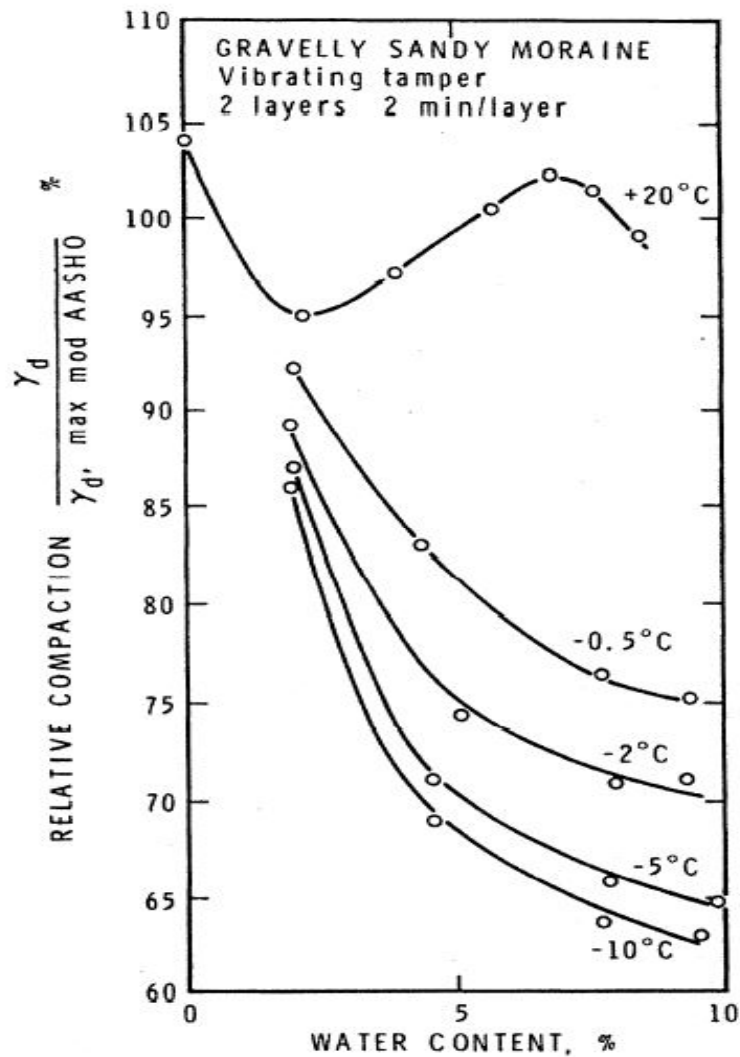


그림 9 함수비에 따른 온도별 상대다짐도의 경향 (Heiner, 1972)

동결온도에서 다짐 시 형성된 얼음덩어리들은 압축과 변형이 동시에 발생되어 얼음조각의 형태로 변하게 되고 다짐 완료 후 이 조각들은 얼음의 결집력으로 인해 서로 결합하여 표면상으로는 매우 단단한 형태를 보인다. 하지만 해빙기 용해 시 얼음의 결집력은 사라지게 되고 저하된 건조단위중량으로 인해 흙이 하중에 저항할 수 있는 능력 또한 저하된다.

동결기 다짐 시 건조단위중량의 감소는 영하의 온도에서 생성된 얼음덩어리의 크기 및 특성과 밀접한 관련이 있다. 동결된 지반에서 다짐에 의해 생성된 파편들은 순수한 토립자와 얼음과 토립자가 결합된 얼음덩어리의 두 가지 형태로 존재하게 되며, 그림 10은 동결된 자갈에서 초기 함수비에 따른 얼음덩어리의 직경(D_{60})을 나타낸 그림이다. 함수비가 증가할수록 동결 시 발생하는 얼음의 결집력 또한 커지므로 더 큰 직경의 얼음덩어리가 형성됨을 확인할 수 있다. 또한 함수비가 5% 이하일 경우에는 얼음덩어리의 직경이 비교적 균질하게 나타나지만 함수비가 5%보다 클 경우에는 얼음덩어리의 직경이 매우 불균질하게 형성됨을 확인할 수 있다. 이러한 얼음덩어리의 불균질성은 동결 지반의 역학적 특성을 파악하기 위한 시험을 수행할 때 고려해야할 요소 중 하나이다.

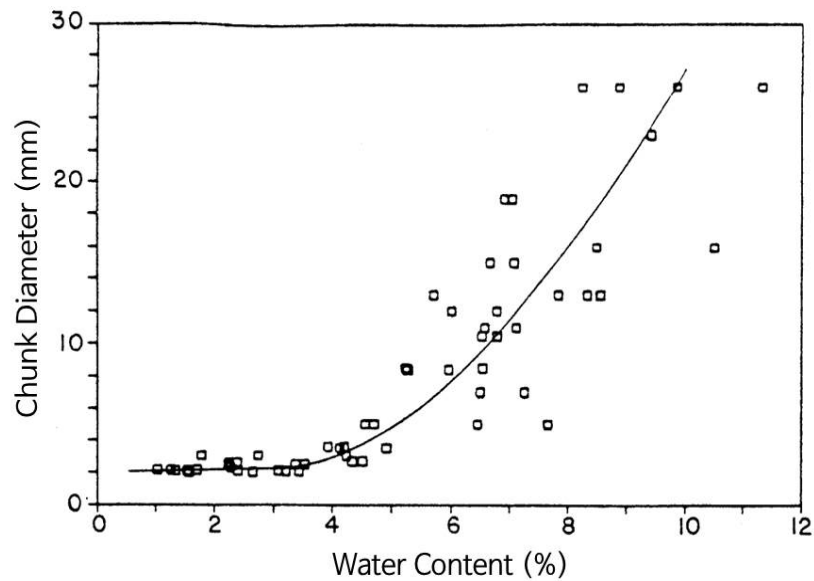


그림 10 세립분을 5% 함유한 동결된 자갈에서 함수비에 따른 D60 (Haas and Barker, 1988)

그림 11은 동결온도에서 사질토의 함수비에 따른 건조단위중량의 관계를 나타낸 그림이다. 함수비가 증가할수록 동결온도에서 사질토의 건조단위중량이 감소함을 확인할 수 있다. 이는 다시 말하여 얼음덩어리의 직경이 커짐에 따라 건조단위중량은 감소하는 것으로 볼 수 있다. 동결 온도에서 높은 함수비로 제작된 시료의 단위중량은 최대건조단위중량의 약 75~80% 수준이며 최소건조단위중량에 근접한 값을 나타낸다. 동결기 다짐시공으로 인해 채움 시공이 낮은 단위중량으로 이루어질 경우 해빙기에 큰 침하를 초래하며, 강도적인 측면에서도 구조물의 안전성에 영향을 미치게 된다.

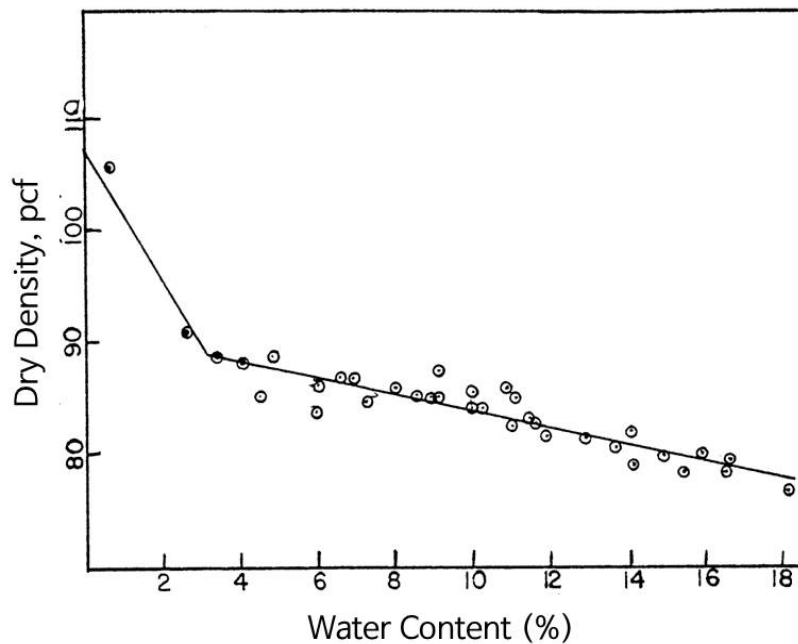


그림 11 동결온도에서 사질토의 함수비에 따른 건조단위중량 (Hass, 1988)

Tart(1983)는 동결토로 다짐 시공 시 단위중량을 예측할 수 있는 방법을 제안하였다. 먼저 얼음덩어리의 비중을 식 3에 따라 산정한다.

$$G_{co} = \gamma_t / \gamma_w \quad \text{식 3}$$

여기서, G_{co} : 얼음덩어리의 비중
 γ_t : 흙의 전체 단위중량
 γ_w : 물의 단위중량

흙이 포화상태일 경우 흙의 총 단위중량과 포화단위중량이 같으므로, 토립자의 비중과 함수비를 알 경우 식 4를 통해 γ_t 를 구하여 얼음덩어리의 비중을 산정할 수 있다.

$$\gamma_{t(sat)} = \frac{G_s \gamma_t (1+w)}{(1+G_s w)} \quad \text{식 4}$$

여기서, $\gamma_{t(sat)}$: 흙의 포화단위중량
 G_s : 흙의 비중
 γ_w : 물의 단위중량
 w : 십진법으로 나타낸 흙의 함수비

또한 동결토로 다짐된 지반의 단위중량 산정 시 지반의 간극비도 알아야 하며 일반적으로 동결된 지반의 간극비는 0.3에서 0.6사이의 값을 나타낸다. 그 후 식 5와 식 6을 통해 동결토로 다짐된 지반의 단위중량을 산정할 수 있다.

$$\gamma_f = \frac{G_s \gamma_w}{(1+G_s w)(1+e_f)} \quad \text{식 5}$$

여기서, γ_f : 동결토로 다짐된 지반의 단위중량
 e_f : 동결토로 다짐된 지반의 간극비

식 5를 정리할 경우 식 6과 같다.

$$\gamma_f = \frac{G_{co} \gamma_w}{(1+e_f)} \quad \text{식 6}$$

그림 12은 비중이 2.70인 흙의 함수비에 따른 간극비와 건조단위중량의 관계를 나타낸 그림이다. 간극비가 증가할수록 다짐된 지반의 건조단위중량은 감소하며, 함수비가 증가할수록 간극비의 증가에 따른 건조단위중량의 감소율이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 함수비가 증가할수록 형성되는 얼음의 양이 많아지며 얼음덩어리의 직경 또한 커지기 때문인 것으로 판단된다.

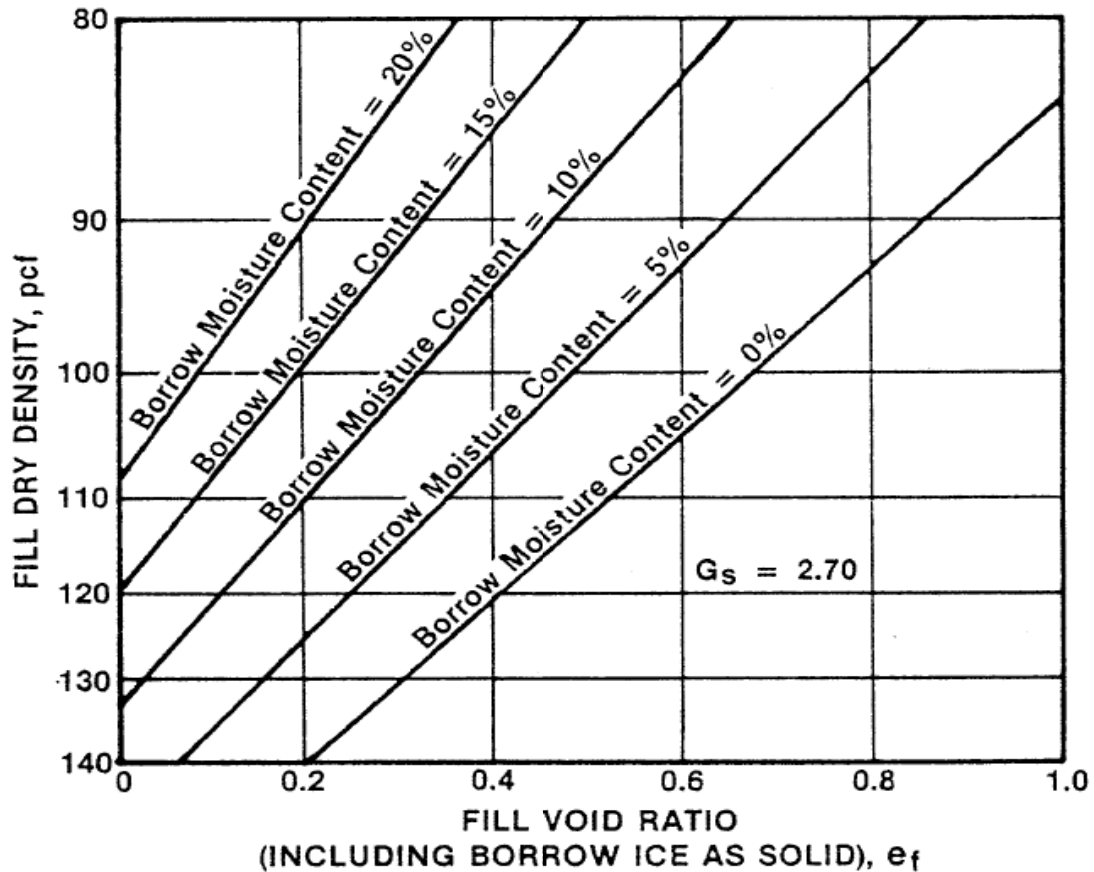


그림 12 비중이 2.7인 동결토의 다짐 시 간극비에 따른 단위중량 (Tart, 1983)

Wilbur M. 등(1978)은 낮은 온도에서 다짐효과를 증대시키기 위한 방법에 대해 연구하였으며 그 결과 동결된 지반 다짐 시 건조단위중량은 감소하며 최적함수비의 뚜렷한 경향은 찾을 수 없었다. 또한 염화칼슘과 같은 첨가제를 지반에 섞을 경우 첨가제가 지반의 동결 온도를 낮추어 다짐효과가 증가하는 것으로 나타났다.

4) 동절기 다짐시공에 대한 해외 기준 조사

성토와 포장, 댐의 건설에서 동결토의 사용은 가능하지만 피해야하지만 고지대의 대규모 공사에서는 종종 필요로 한다. 실질적으로 세립질 동결토를 사용하여 만족스러운 다짐도의 성토는 불가능하며, 적절한 다짐도를 획득하기 위해서는 동결온도보다 높은 온도에서 시공을 해야 한다. 동결 온도에서 다짐 시 모래, 자갈, 깨진 암석과 같은 조립토의 경우에도 많은 한계가 존재하지만 시공 관리를 통해 어느 정도의 다짐도는 획득할 수 있다. 다음은 Freitag와 McFadden(1997)에서 발췌한 동절기 건설공사의 기준에 대한 내용이다.

(1) 준비 및 시공 과정

동절기 성토 시공 시에는 동결에 덜 민감한 재료를 사용해야 한다. 이러한 흙을 사용할 경우 낮은 함수비에서는 높은 품질의 성토와 다짐시공을 실시할 수 있다. 이를 만족하는 함수비의 범위는 2~3%의 범위이다(McFadden and Bennett, 1991). 낮은 함수비에서 결합한 얼음은 다짐에너지에 저항하기에는 너무 얇으며, 흙 입자의 대부분이 동결되지 않아 상온에서의 거동과 유사하게 나타난다. 또한 해빙기에 융해가 발생하여도 얼음의 체적이 작기 때문에 침하가 발생되지 않는다.

토사 채취장의 흙은 겨울철 굴착과정에서 느슨한 상태가 된다. 이 상태로 지반이 동결되어 얼음덩어리를 형성할 경우 최대 0.9 m에 달하는 얼음덩어리가 형성되어 시공성이 매우 떨어지게 된다(Tart, 1983). 일부 공정에서 얼음덩어리의 직경을 줄이기 위해 파쇄장비를 사용하여 운반과 다짐을 용이하게 하기도 한다. 하지만 큰 얼음덩어리는 성토 시 사용을 피하여야하고 시공이 불가피한 경우는 얼음덩어리를 파쇄장비나 다짐장비로 작은 크기로 만들어 준 후 시공을 해야 한다.

파쇄장비를 사용할 경우는 매우 낮은 온도에서 효과적이다. 동결 온도 근처에서 얼음덩어리를 파쇄 할 경우 충격으로 생성되는 열로 부분적으로 융해가 발생된다. 융해된 흙은 공정과정에서 다시 동결되면서 장비의 표면에 달라붙게 된다(Crory 1991). 이를 방지하기 위한 방법으로는 흙의 동결온도를 낮추기 위해 나트륨을 첨가하거나, 흙과 접촉하는 장비의 일부분을 비금속성 물질로 만들거나 열선을 설치할 수 있다.

(2) 성토 및 다짐

동결기 건설공사 시 채취된 흙을 기존의 지표면 위에 뿌리기 전에 빙설의 유무를 확인하여 표면에 존재하지 않을 경우 시공을 해야 한다. 만약 성토층의 두께가 충분히 깊을 경우는 성토층의 하중에 의해 기존의 지표면이 다져지기 때문에 시공이 가능하다. 이 경우에는 채취된 토사에서 얼음덩어리가 생성되지 않도록 주의해야 한다.

채취된 토사가 거의 건조 상태일 경우에는 일반 장비로도 충분한 다짐도를 획득할 수 있다. 하지만 흙의 함빙비가 2~3%일 경우에는 다짐 시공은 어려워진다. 그림 13은 톱니바퀴형 롤러를 가진 다짐 장비를 사용한 동결토의 다짐 시공 사진이다. 이러한 장비를 사용하여 동결 온도에서 형성된 얼음덩어리의 직경을 줄일 수는 있으나, 일반적인 다짐 장비를 사용한 것과 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 확인되었다.

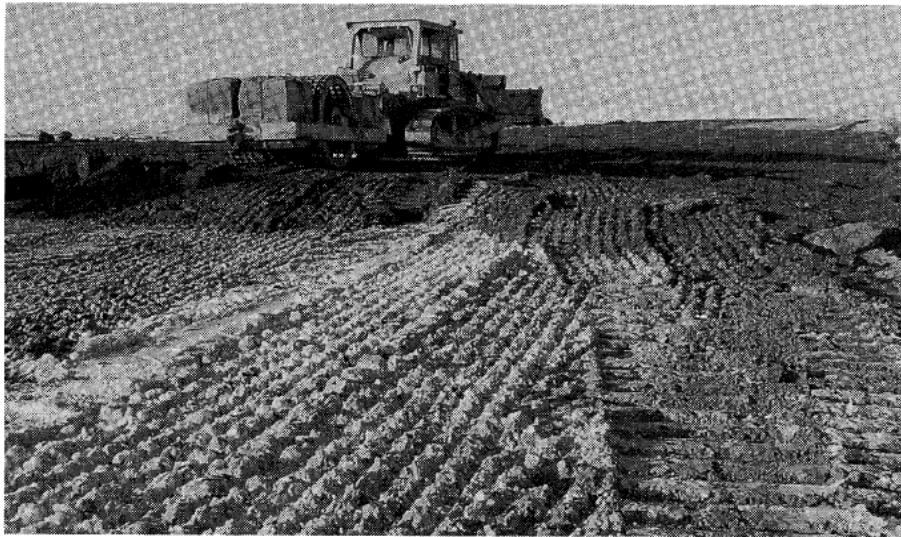


그림 13 톱니바퀴형 롤러 다짐기를 사용한 동결토의 다짐시공 (Crory, 1991)

(3) 유지관리

동결된 흙으로 성토된 현장은 매우 엄격한 유지관리가 요구된다. 그러나 유지관리를 모든 부분에서 진행하기 보다는 필요성을 예측하여 불필요한 과정을 최소화 하고, 반드시 필요한 부분에 대해서만 이루어져야 할 것이다. 성토재를 보관함에 있어서는 간이 포장을 실시하여 즉시 사용할 수 있는 상태를 유지하도록 해야 한다. 해빙기가 시작되어 얼음이 녹기 시작하면 현장의 계측과 보수가 진행되어야 한다. 보수 작업은 지표면에 발생된 국부 침하가 주변지반을 더욱 악화시키기 전에 신속히 이루어져야 한다.

사면의 경우는 심각한 문제가 아니면 보수를 하지 않도록 한다. 사면에서의 작은 결함은 배수의 문제만 생기지 않는다면 흙 입자간의 마찰 저항으로 극복할 수 있다. 사면의 보수작업이 필요할 경우에는 식생과 배수에 문제가 생기지 않도록 주의해야 한다.

2절 영하온도에 따른 불포화함수특성에 관한 선행연구 분석

일반적으로 토질역학에서 포화토 이론을 적용하는 것과는 달리 실제 지반은 불포화상태로 존재하고 있으며, 지반재료의 불포화 특성은 사면이나 소규모 댐의 침투특성 뿐만 아니라 강도특성에도 중요한 영향을 미치고 있다. 최근, 국내 지반공학 분야에서도 불포화 영역에 대한 관심이 증가하고 있으며, 지반재료의 불포화 특성 평가를 위한 연구가 진행되고 있다. 본 연구의 시험결과에 앞서, 영하온도에 따른 불포화 함수특성을 파악하기에 적합한 연구들에 대해 몇 가지 정리하였다.

1) 불포화토의 기본이론

지금까지 지반공학 분야에서 수행되고 있는 대부분의 연구는 Terzaghi에 의해 제안된 유효응력 이론을 바탕으로 하는 포화토를 중심으로 수행되고 있지만 실제 지반은 부분적으로 포화되어 있는 불포화토 상태로 존재한다. 포화토의 경우 간극이 모두 물로 채워져 있어 흙입자와 함께 이상구조를 이루는 반면, 불포화토의 간극은 물과 공기가 함께 존재하여 물, 공기, 흙입자의 삼상구조를 가진다. 그림 14는 불포화토의 삼상구조를 나타낸 그림이다. 간극에 존재하는 물과 공기 사이에는 접촉면(contractile skin)이 존재하며, 이 접촉면 사이에 발생하는 표면장력(surface tension)을 통해 모세관현상이 유발되는 등 불포화토의 역학적 거동에 중요한 영향을 미친다.

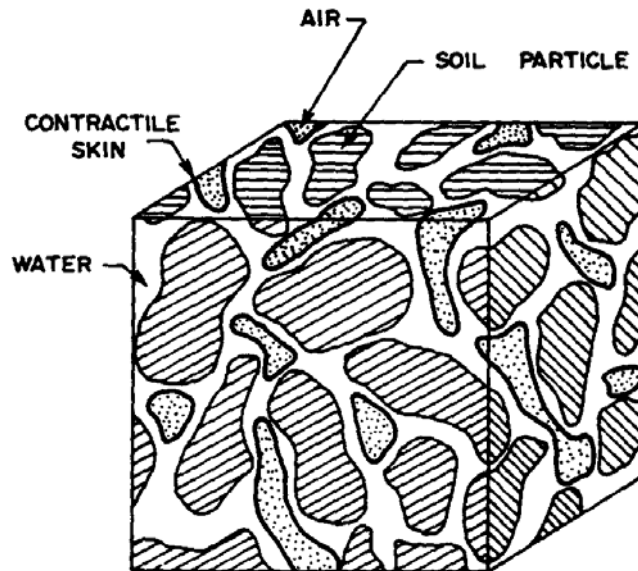


그림 14 불포화토의 삼상구조 (Fredlund and Morgenstern, 1977)

(1) 불포화토의 흡수력

포화된 지반과는 다르게 불포화 지반에서는 모관흡수력(matric suction)이라 불리는 음의 간극수압이 발생한다. 모관흡수력은 불포화토의 가장 중요한 특성 중의 하나이며, 유효응력을 감소시키는 양의 간극수압과는 달리 유효응력을 증가시키기 때문에 불포화지반은 포화지반과는 다른 거동을 나타낸다. 흙의 흡수력(soil suction)의 이론적 개념은 1900년대 토양물리학에서 처음 소개되었으며, 공학적인 문제에 관한 불포화 지반의 흡수력은 영국의 도로 연구소(transport research laboratory)에서 소개된 후 토목 분야에 도입되었다.

모관흡수력은 간극 내 물의 자유에너지 상태(free energy state of soil water)로 정의되며, 자유에너지는 부분증기압(partial vapor pressure)의 형태로 측정될 수 있다(Richards, 1965). 흡수력과 부분증기압의 열역학적인 관계를 식 7과 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi = - \frac{RT}{\nu_{w0} \omega_v} \ln \left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}} \right) \quad \text{식 7}$$

여기서, ψ = 흙의 흡수력 또는 전 흡수력 (kPa)

R = 절대기체상수 [$8.31432 J/(mol \times K)$]

T = 절대온도 [$T = 273.15 + t^{\circ} \times K$]

t° = 섭씨온도 ($^{\circ}C$)

ν_{w0} = 물의 비체적 [$1/\rho_w (m^3/kg)$]

ρ_w = 물의 밀도 ($t^{\circ} = 20^{\circ}C$ 일 때, $998 kg/m^3$)

w_v = 수증기의 분자량 ($18.016 kg/kmol$)

$\bar{u}_v$ = 간극수의 부분 증기압 (kPa)

$\bar{u}_{v0}$ = 순수한 물의 포화 증기압 (kPa)

흙의 흡수력은 전 흡수력(total suction)이며, 이는 표면장력에 의해 발생하는 모관흡수력(matric suction)과 간극수에 용해된 염분의 농도변화에 따라 발생하는 삼투흡수력(osmotic suction)으로 나눌 수 있다. 전 흡수력은 다음 식 8와 같이 표현할 수 있다.

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad \text{식 8}$$

여기서, ψ = 전 흡수력 (total suction)
 $(u_a - u_w)$ = 모관흡수력 (matric suction)
 u_a = 간극공기압 (pore air pressure)
 u_w = 간극수압 (pore water pressure)
 π = 삼투흡수력 (osmotic suction)

화학적인 오염 등으로 인한 염분함량의 변화가 발생하는 특수한 경우 삼투흡수력이 불포화토의 거동에 영향을 미칠 수 있지만, 일반적인 지반공학적 문제에서 발생하는 전 흡수력의 변화는 대부분 모관흡수력의 변화와 같다고 볼 수 있다. 모관흡수력은 간극에 존재하는 물과 공기의 접촉면에서의 수압과 공기압의 차이를 말하며, 강우로 인한 함수비의 변화와 같은 외부환경의 변화에 민감하게 반응하여 흙의 평형상태에 영향을 미친다. 반면, 삼투흡수력은 간극수에 용해된 염분이나 철분 등의 농도에 따라 발생하므로 함수비 변화에 대해 민감하게 반응하지 않는다. 즉, 함수비 등으로 인한 유효응력의 변화로 인해 발생하는 일반적인 지반공학적 문제에서 전 흡수력의 변화에 미치는 삼투흡수력의 영향은 매우 미미하다고 할 수 있다.

모관흡수력은 간극크기분포에 영향을 받으며, 일반적으로 대기압($u_a=0$) 상태인 간극 공기압에 대하여 부압력을 가지므로 음의 간극수압이 발생한다. 음의 간극수압은 지반에 압축력을 가하며, 유효응력의 증가에 따른 강도를 증진시키는 효과가 있다.

(2) 불포화 함수특성곡선

물과 공기의 접촉면에서의 수압과 공기압의 차이로 인해 발생하는 모관흡수력이 불포화토의 거동에 가장 중요한 영향을 미치는 설계변수로 알려져 있다. 따라서 불포화토와 관련된 강도, 변형 또는 침투 등의 거동을 파악하기 위해서는 모관흡수력의 영향을 고려하여야 한다(Fredlund 등, 1994; Vanapalli 등, 1996). 지반의 불포화특성을 파악하기 위한 수분과 흡수력의 관계는 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)를 통해 나타낼 수 있다.

① 함수특성곡선의 정의

함수특성곡선은 흙 시료의 흡인력에 대한 수분보유능력을 나타내는 곡선으로, 일반적으로 체적 함수비와 모관흡수력의 관계로 표현된다. 지반 내에 존재하는 수분의 양은 중량함수비(gravimetric water content), 체적함수비(volumetric water content) 또는 포화도(saturation)로

표현할 수 있지만, 불포화토의 거동을 해석하기 위해서는 지반의 구성요소인 물, 공기, 흡입자의 세 가지 구성성분을 동시에 고려하여야 한다는 특성상 포화토 해석에서 사용되는 중량함수비 보다는 간극공기를 고려하는 체적함수비 개념을 적용하는 것이 적합하다.

그림 15는 전형적인 함수특성곡선을 나타낸 그림이다. 흡수력의 변화에 따른 수분의 상태에 따라 포화영역(saturated zone), 전이영역(transition zone), 잔류영역(residual zone)으로 구분할 수 있다. 초기상태인 포화영역 구간에서 모관흡수력이 공기함입값(air-entry value)보다 낮은 상태에서는 간극 속의 수분이 유출되지 않는다. 간극으로 공기가 계속 유입됨에 따라 모관흡수력이 증가하여 공기함입값에 도달한 지점부터 전이영역 구간으로 구분되며, 모관흡수력의 증가와 함께 수분의 유출량이 증가하여 함수비가 급격하게 감소한다. 마지막으로 모관흡수력의 증가에도 불구하고 수분이 유출량이 감소하는 구간을 잔류영역이라 한다.

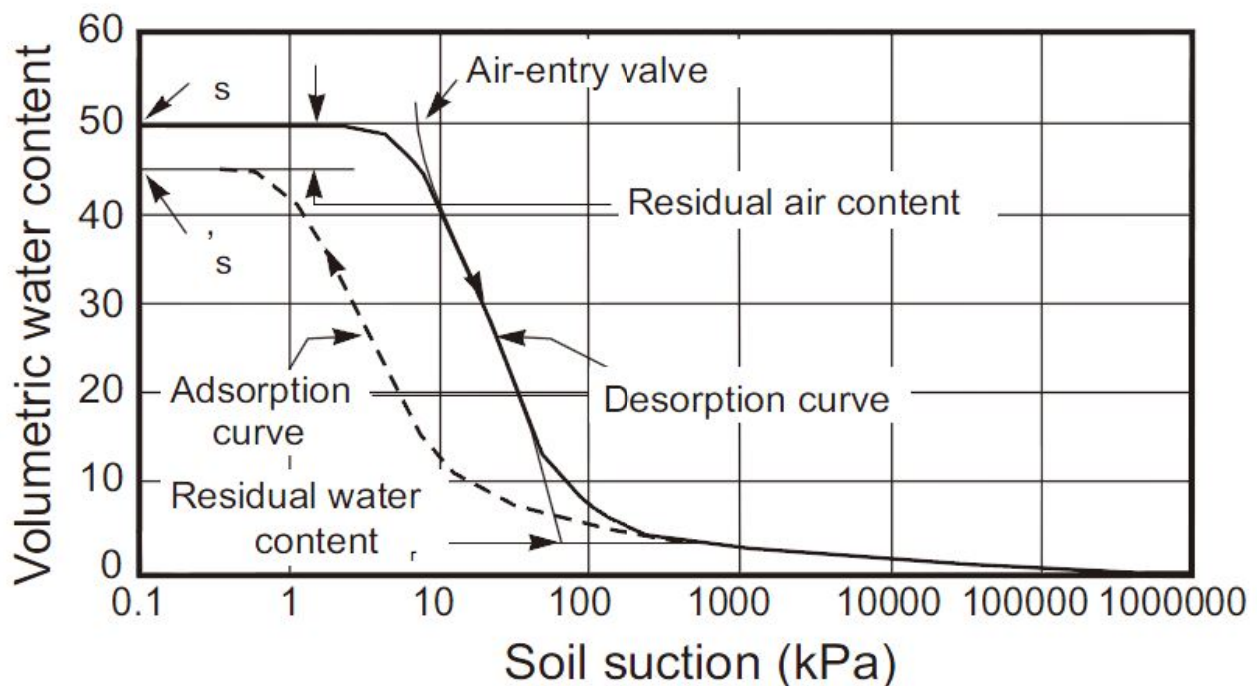


그림 15 전형적인 함수특성곡선(Fredlund and Xing, 1994)

공기함입값은 포화지반의 간극에 공기가 유입되기 시작하는 흡수력을 말한다. 공기함입값 이전의 포화구간에서 간극의 수분이 최대가 되며, 이때의 함수비를 포화함수비(saturated water content)라고 정의한다. 실제 지반에서의 포화함수비는 수분에 용해된 공기를 포함하고 있기 때문에 5~10% 정도 낮게 나타나는 것으로 알려져 있다. 모관흡수력의 증가에도 더 이상 물이 유출되지 않는 상태의 함수비를 잔류함수비(residual water content)라고 정의하며, 잔류함수비에 해당하는 간극 내의 수분은 자연상태에서는 제거되지 않으며 열에 의해서만 제거된다. 함수특성곡선의 변곡점은 공기함입값과 잔류함수비를 결정짓는 중요한 요소이므로, 함수특성곡선은 지반의 불포화특성을 파악하기 위해 반드시 고려해야 하는 기본 물성이라 할 수 있다.

② 함수특성곡선의 특징

불포화 함수특성은 흙입자의 구조나 배열, 입도분포, 상대밀도, 온도, 입자간의 화학적 결합 등에 따라 다르게 나타난다. 그림 16은 지반재료로 사용되고 있는 점토, 실트, 모래에 대한 함수특성곡선의 일반적인 경향을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 16을 보면, 모래에서 점토로 흙의 소성도가 증가할수록 포화함수비와 공기함입값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 모래의 경우 비교적 간극이 크고 입자가 균질하여 간극 내의 수분함량을 결정하는 흡수력이 좁고 낮은 구간에 위치하지만, 소성도가 큰 점토의 경우 간극이 작을 뿐만 아니라 입자간의 전기-화학적 결합으로 인해 비표면적이 커져 흡수력의 범위가 크고 넓은 구간을 필요로 한다. 이는, 지반 내에 세립분의 함량이 클수록 물을 함유할 수 있는 능력이 증가하며, 함수특성곡선의 크기가 커지고, 곡선 기울기가 완만해진다는 것을 뜻한다.

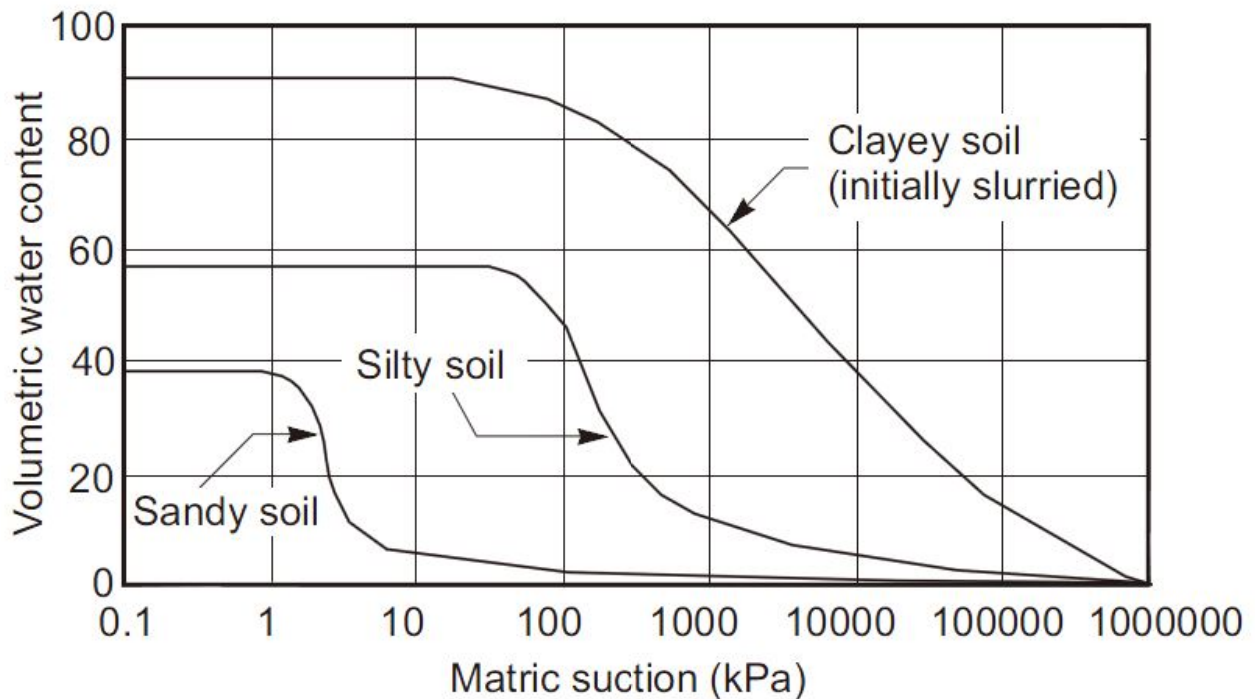


그림 16 흙의 종류에 따른 함수특성곡선(Fredlund and Xing, 1994)

(3) 함수특성곡선의 맞춤 방정식 모델

실내시험을 통해 획득한 흡수력-함수비의 관계의 경우 지반 내부에서 연속적으로 변화하는 전단강도, 투수계수 등과는 달리 연속적으로 나타내지 못한다. 따라서 함수특성을 연속적으로 표현하기 위한 방정식 모델에 대한 연구가 수행되었으며, 대부분의 모델은 실내시험의 결과로부터 곡선맞춤(curve fitting)을 통해 획득한 맞춤변수들을 이용하여 맞춤 방정식을 제안하였다(Brooks and Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Fredlund and Xing, 1994). 표 1은 선행연구자들에 의해 제안된 함수특성곡선의 맞춤 방정식 모델 중 대표적인 모델들을 요약한 표이다.

표 1 기준에 제안된 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델

연구자	연구년도	제안식
Gardner	1958	$\theta_d = \frac{1}{1 + a_g \psi^{ng}}$
Brooks & Corey	1964	$\theta_n = \left(\frac{\psi}{\psi_{aev}} \right)^{-\lambda_{bc}}$
Williams et al	1984	$\ln \theta = A + B \ln \psi$
Mckee & Bumb	1987	$\theta_n = \frac{1}{1 + A \exp(a_6 \psi - B)}$
van Genuchten	1980	$\theta_n = \frac{1}{[1 + (a_{vg} \psi)^{n_{vg}}]^{m_{vg}}}$
Fredlund & Xing	1994	$w(\psi) = C(\psi) \frac{w_s}{\ln [e + (\psi/a_f)^{n_f}]^{m_f}}$

여러 지역의 지반 특성에 맞는 함수특성곡선의 맞춤 방정식 모델들이 선행연구들을 통해 이미 상당히 제안되었다. 그 중 대표적으로 사용되고 있는 몇 가지의 모델들에 대해서 정리하였다.

① Brooks and Corey 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델

Brooks and Corey(1964)의 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델은 포화도와 흡수력의 변화에 따른 관계를 고려하여 제안된 가장 초기의 모델이다. Brooks and Corey(1964)의 맞춤모델은 다음 식 9과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Theta_n = S_e = 1 \ (\Psi < \Psi_b) \text{ or } \left(\frac{\Psi_b}{\Psi}\right)^\lambda \ (\Psi \geq \Psi_b) \quad \text{식 9}$$

여기서, Θ = 정규화된 체적함수비 [$\Theta_n = (\theta - \theta_\gamma) / (\theta_s - \theta_\gamma)$]

θ = 현재 체적함수비

θ_γ = 잔류시 체적함수비

θ_s = 포화시 체적함수비

λ = 간극크기 분포와 관련된 변수

Ψ_b = 공기함입값의 모관흡수력

S_e = 유효포화도

Ψ = 모관흡수력

Brooks and Corey(1964)의 맞춤모델은 두 개의 변수로 이루어져 있으며, 간극크기분포 지수 λ 를 지수로 하는 방정식 모델이다. 흡수력이 공기함입값 보다 낮은 영역에서는 포화도를 1로 가정하며, 공기함입값 보다 높은 영역에서는 간극크기분포와 모관흡수력에 따라 값이 변한다. Brooks and Corey(1964)의 맞춤모델은 흡수력이 공기함입값을 넘어서는 직후 체적함수비가 급격하게 감소하는 관계를 보인다. 따라서 체적함수비가 공기함입값 부근에서 급격하게 감소하는 경향을 보이는 사질토와 같은 조립질 재료에는 적합하지만, 체적함수비가 점진적으로 감소하는 세립질의 재료에는 적합하지 않다.

② van Genuchten 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델

van Genuchten(1980)의 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델은 세 개의 변수로 인해 이전의 제안되었던 여러 함수특성곡선의 맞춤모델들 보다 유연한 곡선 형태를 이루며, Brooks and Corey(1964)의 맞춤모델과는 다르게 흡수력이 공기함입값보다 낮은 영역에서도 체적함수비가 모관흡수력에 따라 변한다. van Genuchten(1980)의 맞춤모델은 다음 식 10과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Theta_n = S_e = \left[\frac{1}{1 + (a\Psi)^n} \right]^m \quad \text{식 10}$$

여기서, Θ = 정규화된 체적함수비 [$\Theta_n = (\theta - \theta_\gamma) / (\theta_s - \theta_\gamma)$]

Ψ = 모관흡수력

a = 공기함입값과 관련된 계수

n = 변곡점의 경사와 관련된 계수

m = 잔류함수비와 관련된 계수

van Genuchten(1980)의 맞춤모델의 곡선맞춤계수 m 과 n 은 식 11과 같은 관계로 제안되어 맞춤모델이 두 개의 변수형태로 나타낼 수 있게 하였지만, 이는 함수의 유연성을 감소시키는 작용을 하므로 독립적으로 사용하는 것이 더 적합한 결과를 얻을 수 있다.

$$m = 1 - \frac{2}{n} \quad \text{식 11}$$

③ Fredlund and Xing 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델

Fredlund and Xing(1994)의 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델은 van Genuchten(1980)의 맞춤모델과 같이 3개의 변수로 이루어져 함수특성곡선을 유연한 곡선 형태로 나타낼 수 있으며, 다짐된 흙을 사용해 모델화를 실시하여 모관흡수력을 최대 10⁶kPa까지 고려하여 나타낼 수 있어 잔류 시의 흡수력-함수비의 관계를 잘 구현할 수 있도록 하였다. Fredlund & Xing(1994)의 맞춤모델은 다음 식 12과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta(\Psi) = \frac{1}{\left(\ln \left[e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right)^m} \quad \text{식 12}$$

여기서, e = 자연대수 [2.71828...]

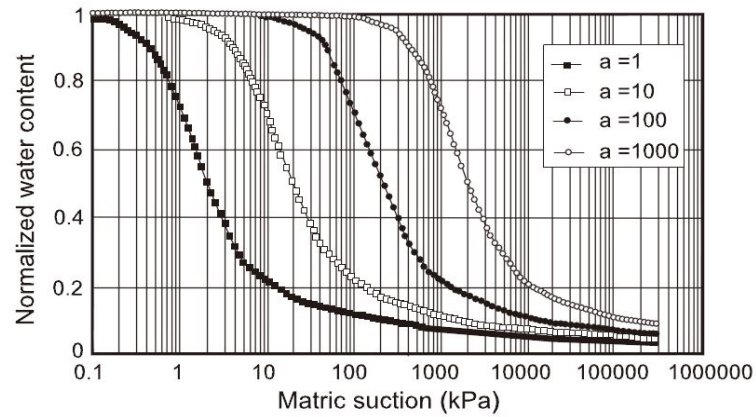
Ψ = 모관흡수력

a = 공기함입값과 관련된 계수

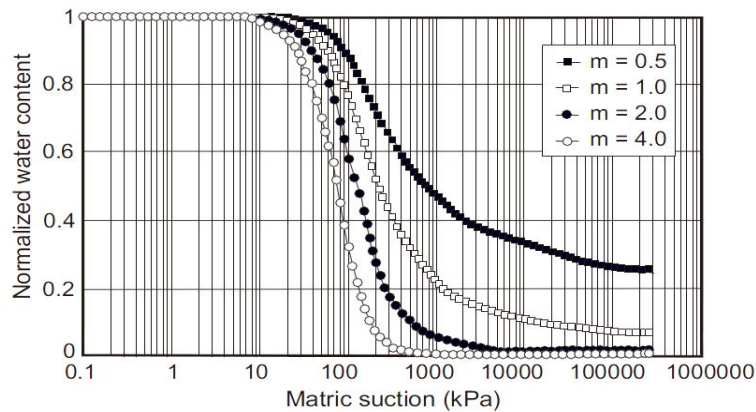
n = 변곡점의 경사와 관련된 계수

m = 잔류함수비와 관련된 계수

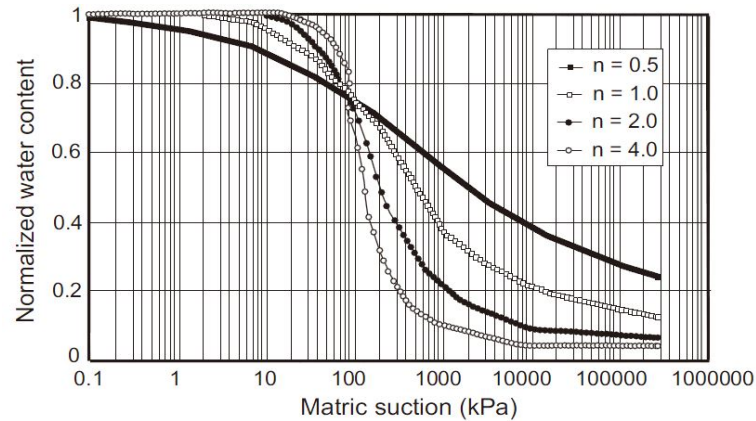
곡선맞춤계수 a 는 공기함입값과 관련된 계수로 일반적으로 공기함입값보다 큰 것으로 알려져 있지만, 흡수력이 높은 구간에서의 잔류함수비와 관련된 곡선맞춤계수 m 이 매우 작다면 계수 a 를 공기함입값으로 정의할 수 있다. 곡선맞춤계수 n 은 함수특성곡선의 기울기와 관련이 있으며, 간극크기의 분포와 관련된 계수이다. 그림 17은 곡선맞춤계수 a , m , n 의 변화에 따른 곡선형태의 변화를 나타낸 그림이다.



(a) 맞춤계수 a 의 변화



(b) 맞춤계수 m 의 변화



(c) 맞춤계수 n 의 변화

그림 17 곡선맞춤계수 a , m , n 의 변화에 따른 함수특성곡선의 형태 변화
(Fredlund and Xing, 1994)

(4) 불포화토의 강도특성

지반공학적으로 발생할 수 있는 문제의 대부분은 전단강도와 관련이 있다. 흙의 전단강도는 응력상태에 따라 좌우되며, Terzaghi가 제안한 유효응력이론이 적용된다. 토질역학에서 일반적으로 사용되고 있는 포화상태 강도특성의 경우 외부 하중에 의해 발생하는 과잉간극수압에 의해 유효응력이 감소하여 지반에 불리한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 반면 불포화상태의 경우 지반에 작용하는 힘이 평형상태일 때 모관흡수력에 의한 음의 간극수압이 발생하여 유효응력을 증가시키는 현상이 발생한다. 모관흡수력은 지반의 함수비, 밀도, 입도분포특성 등의 영향을 받으며, 대기압이 일정할 때 음의 간극수압의 발생에 중요한 역할을 하므로, 불포화지반의 강도특성에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.

포화상태의 전단강도는 Terzaghi의 유효응력이론과 Mohr-Coulomb 파괴규준을 바탕으로 다음 식 13과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{ff} = c' + \sigma'_{ff} \tan \phi' \quad \text{식 13}$$

여기서, τ_{ff} = 파괴시 파괴면의 전단강도

c' = 유효 점착력

σ'_{ff} = 파괴시 파괴면의 유효수직응력

ϕ' = 유효 내부마찰각

전단강도 예측 시, 흙입자와 물의 2상 구조에 대해서만 고려하는 포화상태와는 달리 불포화상태의 경우 공기압에 대한 고려도 필요하다. 불포화 지반의 전단강도 예측에 이용되는 응력상태변수로 순수직응력 $[\sigma - u_a]$ (net normal stress)과 모관흡수력 $[u_a - u_w]$ (matric suction)이 있으며, 두 변수 모두 공기압 u_a 와 관련이 있다. 따라서, 일반적으로 사용되는 포화상태의 전단강도 예측식으로 불포화상태의 전단강도를 예측하는 것은 적절하지 않으며 공기압을 고려할 수 있도록 제안된 새로운 전단강도 예측식을 사용하는 것이 적합하다. 불포화상태의 강도특성을 파악하기 위한 방법으로는 유효응력이론을 바탕으로 하는 Bishop(1959)의 불포화토의 유효응력 제안식과 기존의 Mohr-Coulomb 파괴규준을 바탕으로 공기압을 고려할 수 있는 응력상태변수들이 추가하여 확장시킨 Fredlund & Morgenstern(1978)의 전단강도 제안식이 보편적으로 사용되고 있다.

① Bishop(1959)의 불포화 유효응력 제안식

유효응력이론을 바탕으로 하는 Bishop(1959)의 불포화토의 유효응력 제안식은 다음 식 14와 같다. Bishop(1959)은 순수직응력($\sigma - u_a$)과 모관흡수력($u_a - u_w$)이 조합된 형태의 유효응력을 정의하였으며, 불포화토 유효응력의 비선형적 증가를 나타내기 위하여 매개변수 x 를 사용하였다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad \text{식 14}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } u_a &= \text{간극공기압} \\ \chi &= \text{포화도와 관련된 유효응력계수} \end{aligned}$$

x 는 포화도에 의존하는 유효응력계수로서 0 ~ 1의 범위의 값을 가지며 완전포화 시 $x=1$, 완전건조 시 $x=0$ 의 값을 가진다. Bishop(1959)의 방법은 불포화 강도특성을 유효응력계수 x 로 연관시킴으로서 간편하게 적용할 수 있다는 장점을 가지지만, 흙의 종류에 따라 유효응력계수 x 가 달라지므로 매번 함수특성시험을 통해 규명해야하는 단점이 있다. 따라서 최근에는 기존의 시험결과들의 통계적 분석을 통해 유효응력계수 x 를 수식화하여 간편하게 사용하는 방법들이 제안되고 있다.

② Fredlund & Morgenstren(1978)의 불포화 전단강도 제안식

기존의 파괴규준을 확정하여 제안한 Fredlund & Morgenstren(1978)의 전단강도 제안식은 다음 식 15와 같다.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad \text{식 15}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } c' &= \text{포화토의 점착력} \\ (\sigma - u_a) &= \text{순수직응력} \\ u_a &= \text{간극공기압} \\ \phi' &= \text{포화토의 내부마찰각} \\ (u_a - u_w) &= \text{모관흡수력} \\ \phi^b &= \text{모관흡수력에 따른 전단강도의 증가를 나타내는 각} \end{aligned}$$

기존의 전단강도식에서 강도정수로 사용되고 있는 순수직응력($\sigma - u_a$)의 영향으로 인한 내부마찰각(ϕ')에 불포화 상태에 따른 모관흡수력($u_a - u_w$)에 의한 새로운 강도정수 겉보기마찰각(ϕ^b)이 추가되었다. 기존에 수행된 연구결과들로부터 모관흡수력에 비해 순수직응력이 불포화 지반의 강도특성에 미치는 영향이 더 크며, 두 마찰각의 관계는 $\phi' \geq \phi^b$ 가 성립하는 것으로 알려져 있

다. 실제 겉보기마찰각(ϕ^b)은 흡수력의 증가에 따라 비선형적인 거동을 나타내므로 실험을 통해 흡수력을 획득하여 이 흡수력에 맞는 마찰각을 구할 수 있다. 그림 18은 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 모관흡수력을 고려하여 3차원으로 확장시킨 그래프이다. 겉보기마찰각(ϕ^b)은 일정한 값을 갖는 것으로 고려하였다.

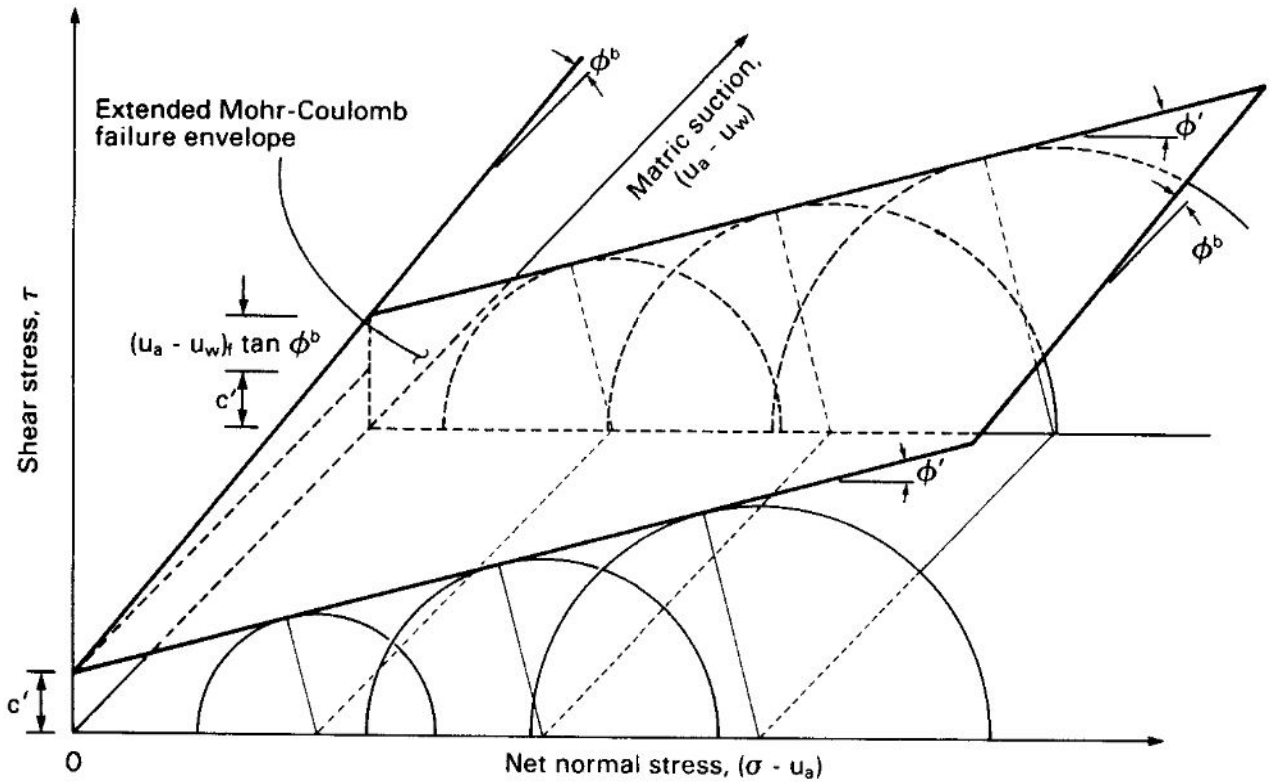


그림 18 불포화토의 확장된 Mohr-Coulomb 파괴포락선(Fredlund 등, 1978)

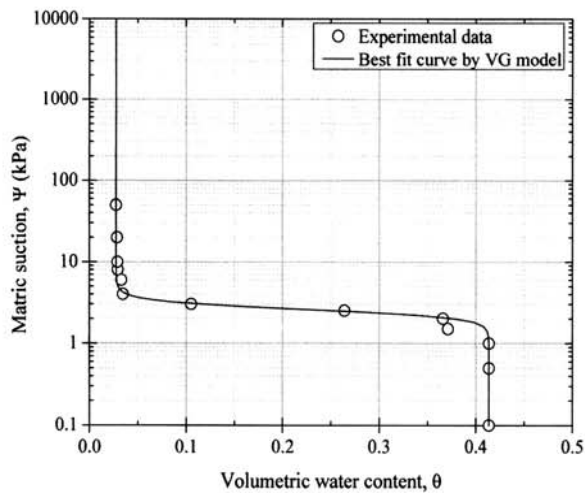
확장된 Mohr-Coulomb파괴면은 모관흡수력에 따른 전단강도를 나타낼 수 있으며, 이에 대한 불포화지반의 절편 c 는 다음 식 16 같다.

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad \text{식 16}$$

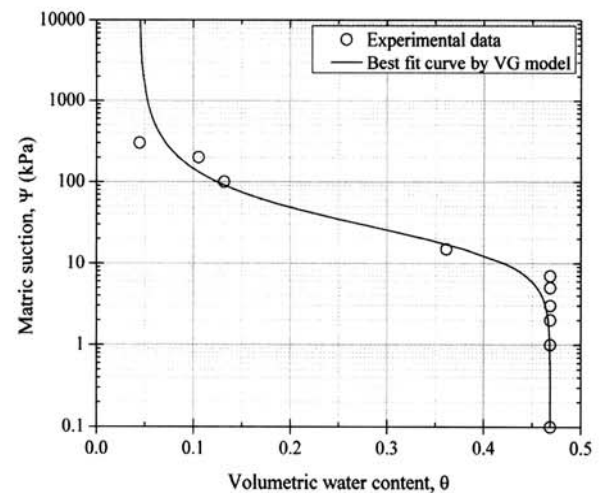
2) 불포화 함수특성곡선에 관한 문헌 연구

(1) 흙의 구조에 따른 함수특성곡선

불포화 함수특성은 흙입자의 구조나 배열, 입도분포, 상대밀도 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 황웅기, 등(2012)은 불포화토에서 흙의 구조적 특성이 불포화 함수특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 조립토인 주문진 표준사와 세립토인 새만금 지역에서 채취한 실트에 대한 불포화 함수특성시험을 수행하였으며 van Genuchten 모델을 사용하여 함수특성곡선을 추정하고 비교하였다. 다음 그림 19는 주문진 표준사와 새만금 실트의 함수특성곡선을 나타낸 그래프이다.



(a) 주문진 표준사



(b) 새만금 실트

그림 19 van Genuchten 모델에 의한 주문진 표준사와 새만금 실트의 함수특성곡선
(황웅기 등, 2012)

시험결과 포화체적함수비, 잔류체적함수비 그리고 공기함입치 모두 세립토인 새만금 실트가 크게 나타나는 것을 확인하였으며, 이는 조립토에 비해 세립토의 간극크기가 작지만 전체 간극물이 더 크고 모관흡수력에서 지배적으로 작용하는 표면력이 크게 작용함에 따른 결과로 판단하였다.

Miller, 등(2002)은 흙의 소성과 다짐에너지가 함수특성곡선에 작용하는 영향을 파악하기 위해 다짐에너지를 다르게 적용한 3종류의 다짐점토에 대한 함수특성곡선을 획득하였다. 그림 20은 3종류의 다짐점토의 함수특성곡선을 나타낸 그래프이다. 시험결과 소성지수 PI값이 클수록 동일한 suction에서 체적함수비가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 소성지수 PI는 시료의 세립분 함량과도 관계가 있으며, 이는 세립분함량이 많을수록 동일한 suction에서 물을 많이 보유할 수 있다는 것을 뜻한다. 또한 시료에 적용한 다짐에너지가 증가할수록 포화함수비는 낮지만 잔류함수비는 높은 것을 확인할 수 있었다. 초기 포화함수비의 경우 다짐에너지에 따른 공극률이 다짐 에너지가 낮을수록 크기 때문에 함수비가 커지지만, suction이 증가하면서 감소하는 함수비의 양 또한 커지기 때문에 잔류영역에 도달했을 때의 함수비는 큰 다짐에너지가 적용된 시료에 비해 낮아지는 것으로 판단하였다.

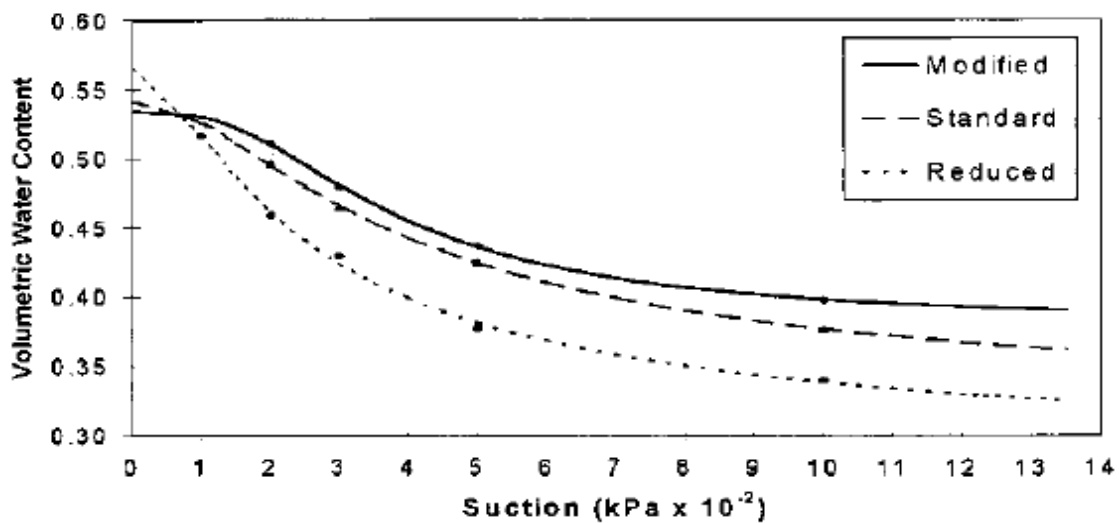


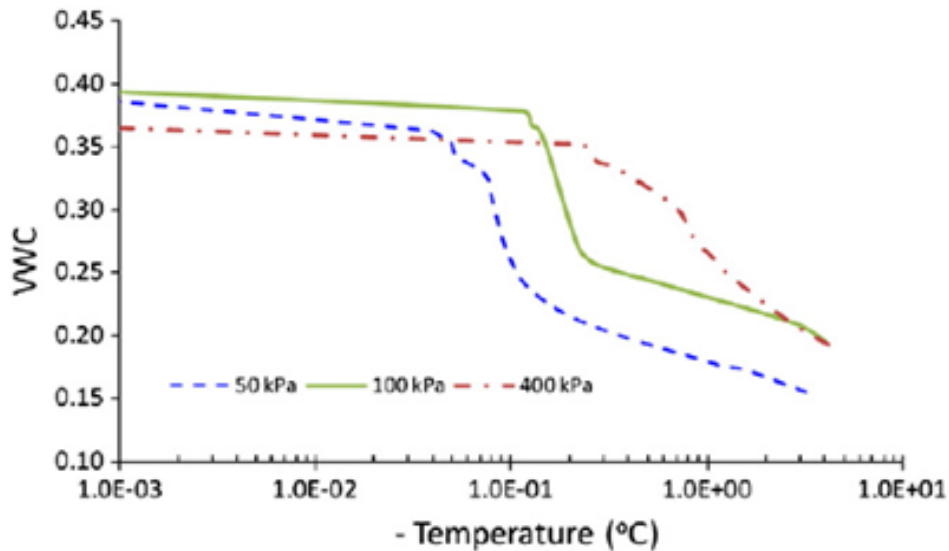
그림 20 다짐방법에 따른 3종류의 다짐점토의 함수특성곡선(Miller 등, 2002)

(2) 영하온도에 따른 함수특성곡선

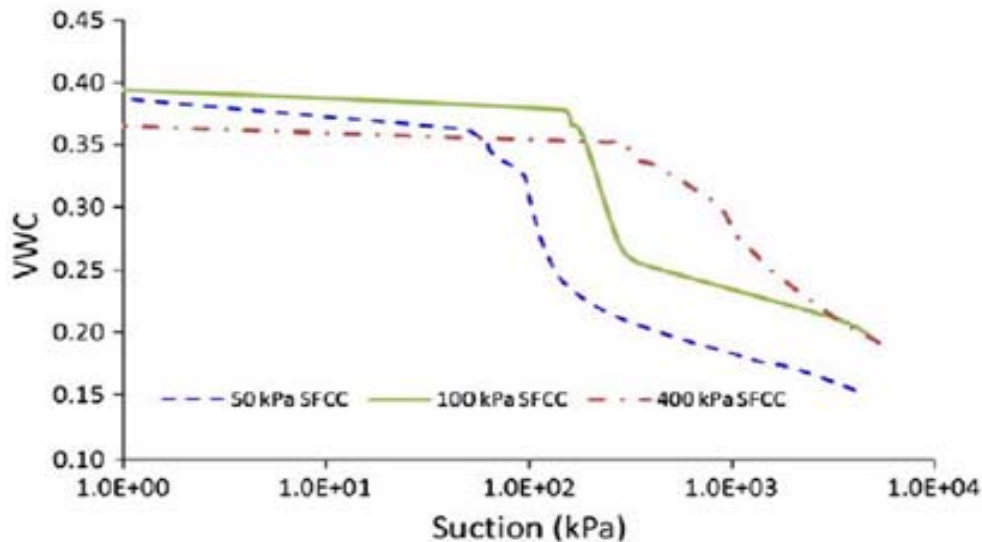
불포화 함수특성시험의 특성상 영하온도 하에서 시험을 수행하는 것은 한계가 있다. 따라서 시료를 동결시킨 상태에서 함수특성시험을 수행한 연구는 전무한 상황이며 기존의 연구들의 경우 온도의 변화에 따른 간극구조의 변화, 압력의 변화 등을 수식으로 표현하여 영하온도에 따른 함수특성의 변화를 예측하는 방법에 관한 연구들이 진행되었다.

영하온도에서 얼음이 생성됨에 따라 지반의 간극구조가 연속적으로 변화하며, 생성되는 얼음의 생산량과 크기 및 형상이 불규칙하기 때문에 동결에 따른 함수특성의 변화를 실험을 통해 파악하기에는 현실적으로 어렵다. 따라서 노정현(2008)은 불포화 지반의 동결 시 함수특성 변화를 추정하기 위해 온도변화에 따른 간극구조와 모관응력상태의 변화를 고려한 예측기법을 제안하였다. 예측식은 Mualem-van Genuchten모형을 바탕으로 포화체적함수비, 잔류체적함수비, Mualem-van Genuchten모델의 매개변수 α 와 n 을 통해 동결 시 변화특성을 예측한다. 그 결과, 동결 시 함수특성곡선이 동일한 suction에서 포화도가 큰 것으로 나타났으며 공기함입치와 관련된 매개변수 α 와 간극크기분포와 관련된 매개변수 n 은 감소하는 경향을 보였다.

Tezera F. Azmatch 등은 불포화토에서의 건조 및 습윤현상이 동결토에서의 동결 및 융해현상과 유사하다는 점을 바탕으로 동결토의 함수특성을 평가하는 간접적인 방법을 제안하였다. TDR을 사용하여 온도의 변화에 따른 체적함수비를 획득하고, 열역학에서 온도에 따른 압력을 나타내는 Clausius-Clapeyron식을 사용하여 온도를 흡수력으로 변환하여 체적함수비-흡수력 곡선을 나타내었으며 이 곡선을 Soil-Freezing characteristic curve(SFCC)로 제안하였다. 50, 100, 400kPa에서 압밀시킨 Devon silt를 사용하여 실험을 진행하였으며 온도변화에 따른 체적함수비의 변화와 온도를 흡수력으로 변환하여 나타낸 체적함수비-흡수력곡선을 그림 21에 나타내었다.



(a) TDR을 통해 획득한 온도에 따른 체적함수비



(b) 체적함수비-흡수력곡선

그림 21 Clausius-Clapeyron식을 사용해 변환한 SFCC

3절 연구수행과정 및 내용

1) 시료준비

본 연구에서는 해빙기 안정성 확보를 위한 동결기 다짐기법 개발을 위하여 영하온도에서의 지반재료의 다짐 특성을 파악하기 위한 다짐시험을 수행하였으며, 동결·융해를 반복 적용시킨 지반재료의 일축압축시험과 체적변형측정을 통해 동결·융해에 따른 해빙기의 성능변화를 평가하였다. 또한 불포화 함수특성시험과 불포화 일축압축시험을 통해 영하온도 및 동결·융해가 지반의 흡수력 변화에 미치는 영향을 파악하였다.

(1) 시료의 기본 물성

본 연구에서는 주문진 표준사, 카올리나이트, 3종의 풍화토(고양A, 용인A, 용인B)를 사용하여 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시료의 역학적 및 물리적 특성을 파악하기 위해 체가름 시험(KS F 2302, 2002), 액성한계 & 소성한계 시험(KS F 2303, 2000), 비중시험(KS F 2308, 2006)을 실시하였다. 그림 22은 본 연구에 사용된 시료의 사진이며 표 2에 시료의 기본물성을 요약하였다.



그림 22 본 연구에 사용된 주문진 표준사(좌), 카올리나이트(우), 풍화토 고양A(하)시료

표 2 본 연구에 사용된 시료의 기본물성

	Liquid limit LL (%)	Plastic limit PL (%)	Specific gravity Gs	Passing percentage of No.200 Sieve (%)	USCS
Jumunjin Sand	–	–	2.61	–	SP
Kaolinite	47.55	31.71	2.49	98.55	ML
Weathered Soil (고양 A)	–	–	2.68	21.72	SW
Weathered Soil (용인 A)	–	–	2.71	19.84	SW
Weathered Soil (용인 B)	–	–	2.74	21.13	SW

세립분 함량에 따른 다짐특성을 파악하기 위해 주문진 표준사와 세립분을 0%, 5%, 10%, 15%의 중량비로 혼합하여 시험을 수행하였으며, 이는 우리나라의 일반적인 풍화토의 세립분 함량이 20% 수준(하승우, 2011)이라는 문헌연구를 토대로 결정하였다. 각각의 세립분 함량에 따른 다짐곡선에서 영공기간극곡선(Zero Air Void Curve, ZAVC)을 결정하기 위한 중요한 인자인 비중을 파악할 필요가 있으며, 비중시험 결과 표 3과 같은 결과를 획득하였다. 시료는 각각의 혼합비에 따라 다른 비중값을 가지며, 세립분 함량이 증가할수록 시료의 비중이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

표 3 세립분 함량에 따른 주문진 표준사의 비중

	Sand 100% Fine 0%	Sand 95% Fine 5%	Sand 90% Fine 10%	Sand 85% Fine 15%
Specific gravity, Gs	2.617	2.616	2.605	2.601

(2) 영하온도에서의 시료 조성

본 연구에서는 영하의 온도 및 동결융해 환경을 조성하기 위해 냉동채임버와 항온항습기를 사용하였다. 1차 년도 시험 수행 시 한국건설기술연구원 극한공학실험실의 대형 냉동채임버를 지원받아 시험을 진행하였으며, 2차 년도 시험 수행 시 한국연구재단의 연구지원을 받아 구비한 냉동채임버를 사용하여 시험을 진행하였다.

① 영하온도에서의 다짐특성을 파악하기 위한 영하온도환경 조성

다짐시험의 경우 실제 현장조건을 최대한 모사하기 위해 모든 시험은 온도가 일정하게 유지되는 대형냉동채임버 내에서 진행되었다. 대형 냉동채임버의 크기는 4,300mm(W) × 5,000mm(L) × 3700mm(H)이며 외부 컨트롤러를 통해 $-50^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위를 0.1°C 단위로 제어 가능하다. 그림 23은 대형 냉동채임버와 온도 컨트롤러의 사진이다. 냉동채임버의 성능을 확인하기 위해 Baker(1976)에 의해 제안된 동토 시험 및 저장 시 허용온도차를 이용하였다. 표 4는 허용온도차의 자세한 내용을 나타낸 표이며, 그림 24는 냉동채임버의 설정온도를 측정한 결과를 시간에 따라 나타낸 그림이다. 냉동채임버의 온도를 -10°C 로 설정하였을 때 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 의 온도차가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 이는 Baker(1976)의 허용온도차 기준인 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 를 만족하므로 냉동채임버의 성능이 이번 실험을 진행하기에 적합한 성능임을 확인하였다. 따라서 본 시험에서는 -3°C 와 -8°C 에 대한 $\pm 0.2^{\circ}\text{C} \sim \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 의 허용온도차를 고려하여 실험을 수행하였다.



그림 23 시험에 사용된 냉동채임버(상)와 온도 컨트롤러(하)

표 4 각 온도에서 동토 시험 및 저장 시 허용온도차 (Baker, 1976)

온도(°C)	0 ~ -2	-2 ~ -5	-5 ~ -10	-10 이하
허용온도차(°C)	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0

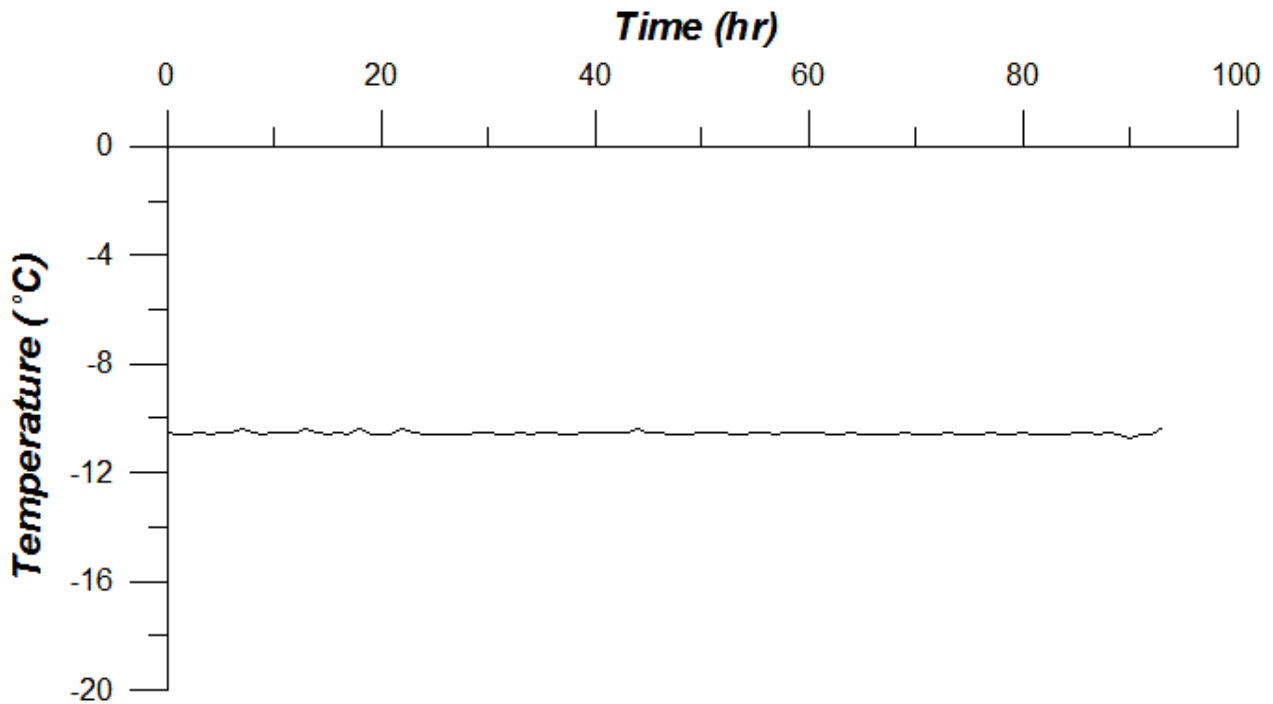


그림 24 냉동채임버의 시간에 따른 온도 측정 결과

② 융해시 거동을 파악하기 위한 동결 및 융해 환경조성

동결기 다짐성토의 융해시 거동을 파악하기 위한 동결 및 융해 환경을 조성하기 위하여 단국 대학교에서 보유하고 있는 냉동채임버와 항온항습기를 사용하였다. 그림 25는 시험에 사용된 냉동채임버와 항온항습기의 사진이다. 냉동채임버의 크기는 500 mm(W) × 500 mm(L) × 500 mm(H)이며 외부 컨트롤러를 통해 -20°C ~ 120°C의 온도범위를 0.1°C 단위로 제어가 가능하다. 또한 냉동채임버의 설정온도를 측정한 결과 Baker(1976)에 의해 제안된 동토 시험 및 저장 시 허용온도차 기준에 만족하는 성능을 타나내어 냉동채임버의 성능이 이번 실험을 진행하기에 적합한 성능임을 확인하였다. 항온항습기의 크기는 500 mm(W) × 500 mm(L) × 600 mm(H)이며 외부 컨트롤러를 통해 -20°C ~ 120°C의 온도범위를 1°C 단위로 제어가 가능하며 설정온도에 대해 오차범위는 ±0.5°C이다. 습도의 경우 30% ~ 98%의 습도범위를 가지며 외부 컨트롤러를 통해 조절이 가능하다. 시료는 비닐로 덮은 후 동결 및 융해를 실시하여 시험을 진행하는 동안 시료가 동결 및 융해되는 과정에서 발생할 수 있는 함수비의 손실을 최소화 하였다.

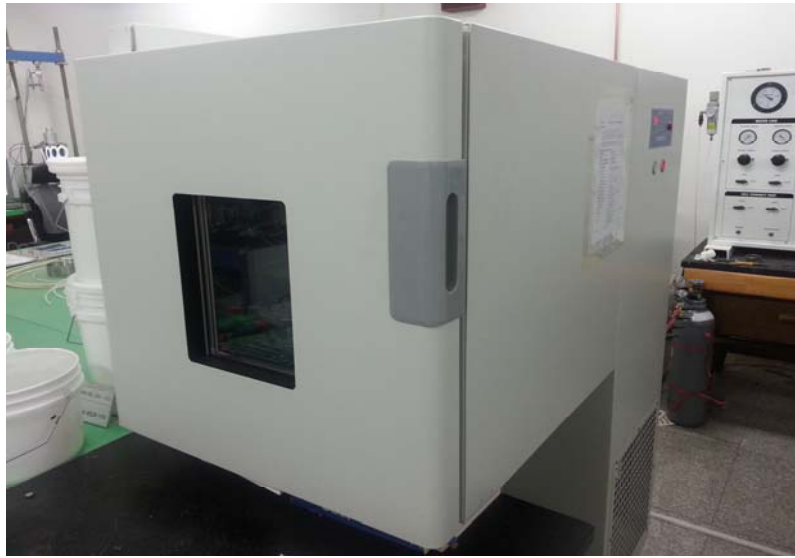


그림 25 동결 및 융해환경 조성에 사용된 냉동채임버(상)와 항온항습기(하)

시료를 완전히 동결시킨 후 다시 완전히 융해시키기 위한 동결 및 융해시간을 설정하기 위해 국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원을 받아 구입한 TDR(Time Domain Reflectometry)함수량계를 이용하여 부동수분을 측정하였다. 부동수분을 측정하기 위한 시료는 직경 10cm, 높이 12.7cm의 몰드에 최적함수비 8.1%로 상대다짐도 95% 이상을 획득하도록 성형하였다. 그림 26은 냉동채임버 및 상온에서 부동수분을 측정하고 있는 사진이며, 그림 27은 -3°C 에서 동결 및 융해 시간에 따른 함수비를 나타낸 그림이다. 동결과정의 경우 약 360분이 경과하는 시점부터 함수비가 약 3.7%에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 설정된 영하온도 -3°C 에서 부동수분

의 수렴값은 약 3.7%이며, 시료가 완전하게 동결되는 데 걸리는 시간이 약 360분이라는 것을 의미한다. 또한 융해과정의 경우 약 60분이 경과하는 시점부터 함수비가 약 8.1%로 동결 전 함수비와 유사한 값에 수렴하는 것으로 보아 완전히 융해된 것으로 판단하였다. 실제 시험에서 사용된 시료는 동결 및 융해시간을 선정하는데 사용된 직경 10cm, 높이 12.7cm의 몰드보다 작은 부피의 시료가 사용되므로 동결 및 융해에 걸리는 시간이 더 짧아질 것으로 판단되며, -8°C 에서의 동결 및 융해시간 또한 -3°C 에서 걸리는 시간보다 짧을 것이라 판단된다. 이를 고려해 동결 및 융해시간을 각각 12시간으로 설정하여 시료가 완전하게 동결 및 융해될 수 있도록 한 후 시험을 수행하였다.

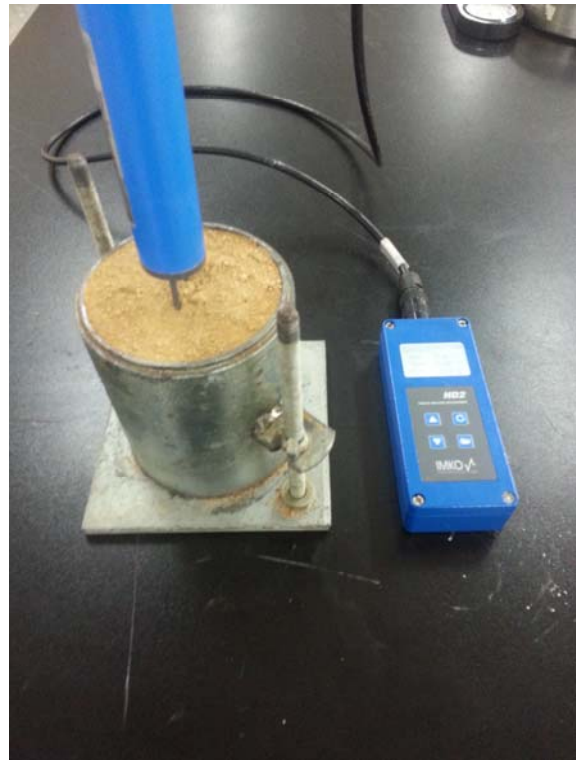


그림 26 냉동제임버(좌)와 상온(우)에서 부동수분을 측정하는 모습

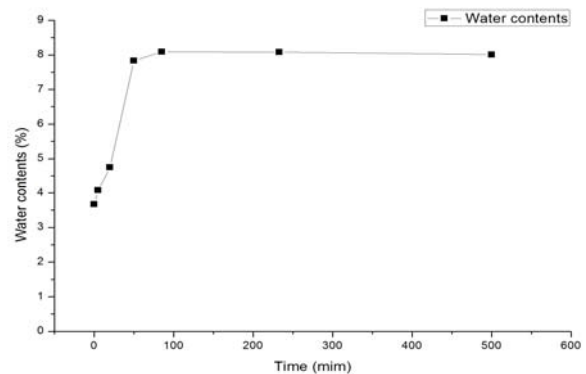
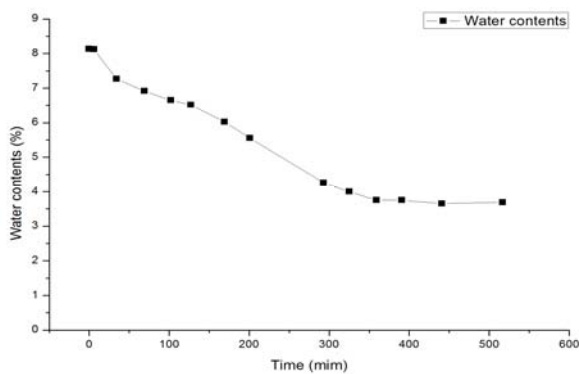


그림 27 -3°C 에서 동결(좌) 및 융해(우)시간에 따른 함수비의 변화

2) 영하온도에서의 다짐시험

본 연구에서는 해빙기 안정성 확보를 위한 동절기 다짐기법 개발을 위하여 영하온도에서의 지반재료의 다짐 특성을 파악하기 위한 다짐시험을 수행하였으며, 다짐시험은 영하온도 조건에서의 다짐 시험에 관한 명확한 기준이 제시되어있지 않다는 점을 고려하여 KS F 2312(2001)의 표준 A다짐방법과 수정 D다짐방법을 수행하였다.

(1) 시험 원리

다짐시험은 소정의 에너지로 흙을 다져서 함수비와 건조단위중량 사이의 관계를 측정하는 시험으로 1933년 R.R. Proctor에 의해 체계적으로 정리되었다. 그는 1/30 ft³(944 cm³)의 몰드에 흙을 3층으로 나누어 넣어 각층마다 5.5 lb(2.5 kg)의 램머를 1 ft(30 cm)의 높이에서 25회씩 낙하시켜 다짐시험을 수행하였다. 그 결과 동일한 에너지로 흙을 다질 경우 건조단위중량이 최대가 되는 함수비가 있다는 것을 발견하였으며, 이를 최적함수비(Omptimum moisture content ; OMC)라 하며 Proctor의 방법은 실내에서의 표준다짐방법으로 널리 알려져 있다. 이후, 2차대전 중 비행장 건설을 위해 Proctor의 표준다짐을 사용하였으나, 항공기를 지지할 수 있는 다짐시공을 위해서는 표준다짐에서의 다짐에너지가 부족함을 알게 되어 수정 Proctor방법이 개발되었다. 수정다짐방법은 1/13.33 ft³(2123 cm³)의 몰드에 흙을 5층으로 나누어 넣고 10 lb(4.5 kg)의 램머로 1.5 ft(45 cm)의 높이에서 55회씩 다지는 방법이다. KS F 2312(2001)에 명시된 다짐방법은 표 5와 같으며, 몰드 및 램머의 허용 치수 범위는 표 6과 같다. 시험에 사용된 몰드 및 램머의 치수를 측정한 결과 모두 KS F 2312(2001)의 기준을 만족함을 표 7을 통해 확인할 수 있으며, 이 결과를 통해 구한 다짐에너지는 표준 A다짐방법이 5.63 kgf·cm/cm³, 수정 D다짐방법은 25.21 kgf·cm/cm³을 나타내었다. 그림 28과 29은 KS F 2312(2001)에서 규정하고 있는 몰드 및 램머의 구조를 나타낸 모식도이다.

표 5 다짐 방법의 종류

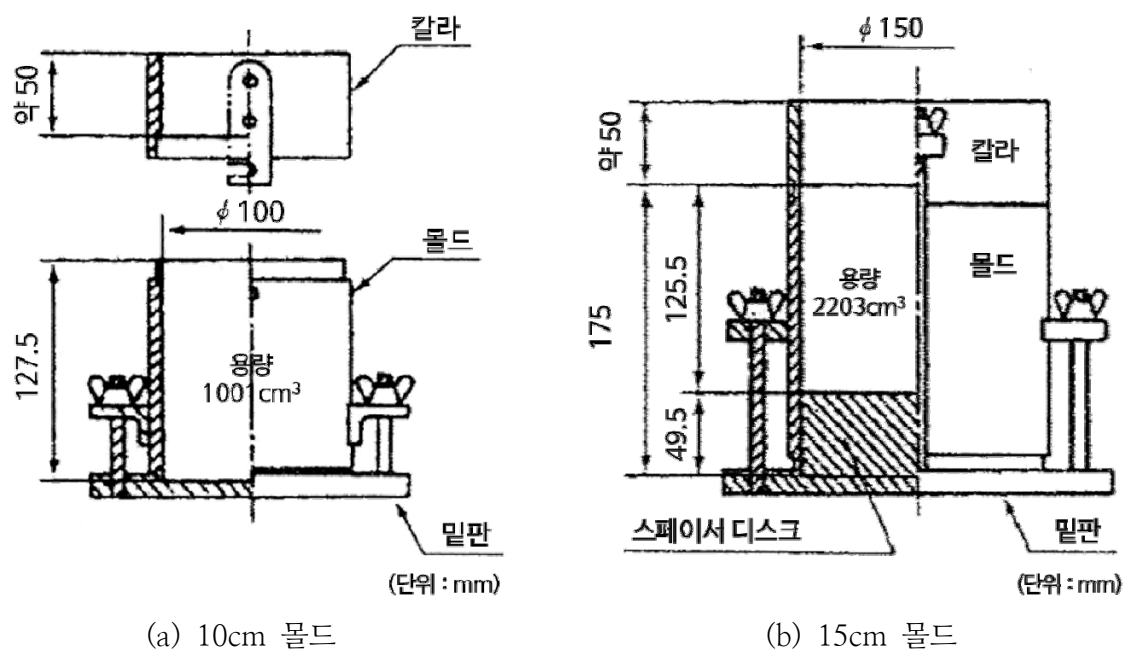
다짐 방법		허용최대입경 (Gmax, mm)	Rammer	Mold	다지기		다짐에너지 (kgf·cm/cm ³)
					층수	낙하수	
표준	A	19.0	소	소	3	25	5.63
	B	37.5	대	대	3	55	15.13
수정	C	19	소	소	5	25	9.38
	D	19	대	대	5	55	25.21
	E	37.5	대	대	3	92	25.30

표 6 몰드 및 램머의 허용 치수

구 분	몰드 (Mold)			램머 (Rammer)		
	내 경 (mm)	높 이 (mm)	부 피 (cm ³)	내 경 (mm)	무 게 (kg)	낙하고 (cm)
소 형	100±0.4	127±0.5	1000±12	50±0.12	2.5±0.01	30±0.15
대 형	150±0.6	125±0.5	2209±26	50±0.12	4.5±0.02	45±0.25

표 7 시험에 사용된 몰드 및 램머의 치수

구 분	몰드 (Mold)			램머 (Rammer)		
	내 경 (mm)	높 이 (mm)	부 피 (cm ³)	내 경 (mm)	무 게 (kg)	낙하고 (cm)
A 다짐	100	127.5	1001.38	50	2.5	30
D 다짐	149.5	125.5	2203.01	50	4.5	45



(a) 10cm 몰드

(b) 15cm 몰드

그림 28 몰드, 칼라 및 밀판의 모식도 (KS F 2312, 2001)

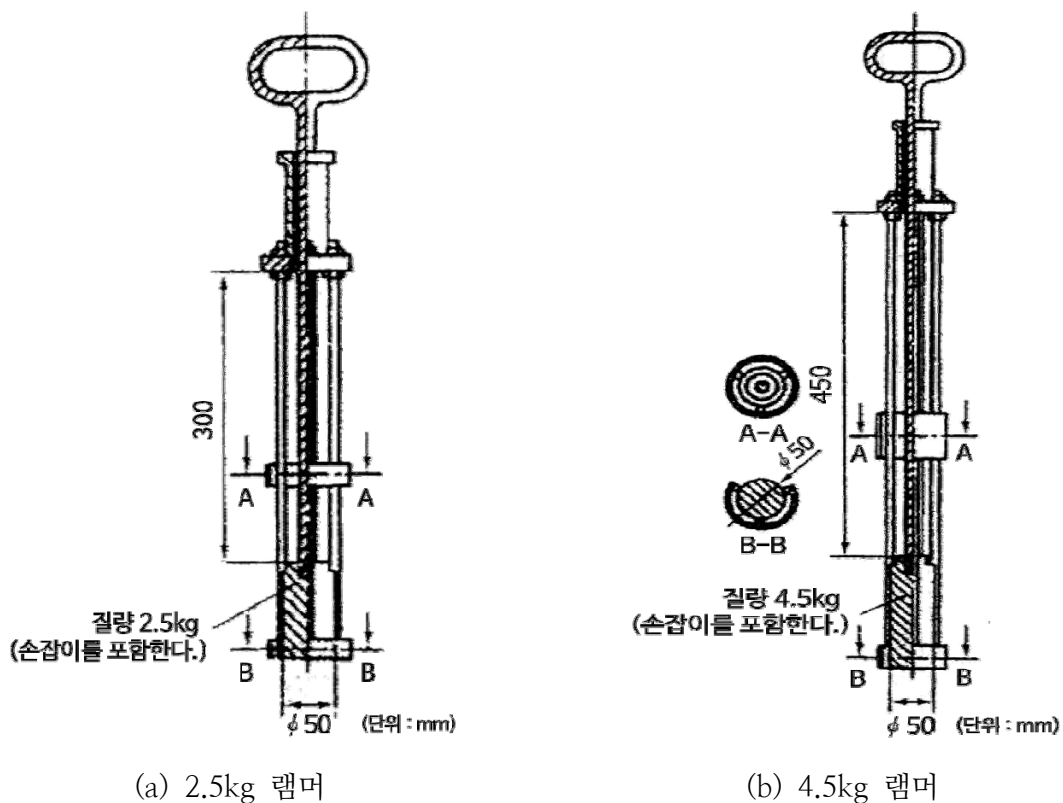


그림 29 램머의 모식도 (KS F 2312, 2001)

① 시료의 준비 및 사용방법

본 연구에서는 KS F 2312(2001)에 명시되어 있는 시료의 준비 및 사용방법의 조합 중 ‘건조법으로 비반복법’을 사용하였다. 표 8은 KS F 2312(2001)에 명시된 시료의 준비 및 사용방법을 나타낸 표이다. 반복법을 사용하여 시료를 만들게 되면 동결 및 용해에 의한 시료의 물리적 특성이 변할 우려가 있지만, 부득이하게 반복법을 사용하여야 하는 경우에는 동결된 시료를 충분히 해동시킨 후에 사용하여야 한다. 시험에 사용된 모든 시료는 시험 전 충분히 공기 건조하였으며, 건조 처리 후 함수비를 측정하여 시료의 함수비가 1%를 넘어가지 않게 준비하였다. 따라서 자연함수비에 영향은 없는 것으로 판단하였다.

표 8 시료의 준비 방법 및 사용 방법의 조합

조합의 호칭명	시료의 준비 방법 및 사용 방법
a	건조법으로 반복법
b	건조법으로 비반복법
c	습윤법으로 비반복법

② 시험방법

시험은 KS F 2312(2001)를 기준으로 다음과 같은 순서로 진행하였다.

- (1) 몰드와 밀판의 질량을 측정한다.
- (2) 시료를 몰드에 넣어 소정의 다짐 방법으로 다진다. 다짐은 견고하고 평평한 바닥위에서 하며, 다진 후 각 층의 두께가 거의 같아지도록 한다. 또한 각 층 사이의 밀착을 좋게 하기 위하여, 다진 각 층의 윗면에 주걱 등으로 가로 · 세로선을 긋는다. 15 cm 몰드의 경우는 시료를 몰드에 넣기 전에 몰드에 스페이서 디스크를 넣고 기름종이를 깔다.
- (3) 다진 후의 시료 윗면은 몰드의 위 끝에서 약간 위가 되도록 한다. 다만, 10 mm를 넘어서는 안 된다.
- (4) 다진 후 칼라를 떼고, 몰드 상부의 여분의 흙을 곧은 날로 주의 깊게 깎아 내고 평면으로 다듬질한다. 자갈 등을 제거함으로써 표면에 생긴 구멍은 입자 지름이 작은 흙으로 메운다.
- (5) 몰드와 밀판의 외부에 붙은 흙을 잘 닦아 내고 전체의 질량을 단다. 15 cm 몰드의 경우는 질량을 측정하기 전에 밀판을 떼고, 몰드에서 기름종이 및 스페이서 디스크를 제거한다.
- (6) 시료 추출기 등을 사용하여 다진 시료를 몰드에서 꺼내고 함수비를 구한다. 함수비 측정용 시료는 상부 및 하부 2곳에서 채취한다.
- (7) 예상되는 최적함수비를 포함한 6~8종류의 함수비로 (1) ~ (6)의 조작을 반복한다.

그림 30은 다짐 후 몰드와 함수비를 측정하는 사진이다. 함수비는 KS F 2306(2000)의 흙의 함수비 시험 방법을 기준으로 측정하였다.



그림 30 다짐 후 몰드(좌)와 함수비 측정(우)

(2) 시험결과

본 연구에서는 동결기 다짐기법 개발을 위한 영하 온도에서의 다짐특성을 파악하기 위해 상온 (18℃), -3℃, -8℃에서 표준 A다짐 시험과 수정 D다짐 시험을 실시하였다. 세립분 함량을 0%, 5%, 10%, 15%로 변화시키면서 획득한 다짐곡선을 통해 각각의 조건에 따른 최대건조단위중량과 최적함수비를 확인할 수 있었다. 표 9는 표준 A다짐과 수정 D다짐의 시험결과를 세립분 함량에 따른 최대건조단위중량과 최적함수비로 나타낸 표이다.

본 국토교통과학기술진흥원의 연구지원을 통해 수행한 표준 A다짐을 통해 파악된 영하온도에 따른 다짐효과를 ‘동결온도에서 다짐효과에 관한 실험적 연구’에 종합하였으며, 수정 D다짐과 부동수분 측정을 통해 파악된 영하온도에 따른 다짐특성을 ‘영하에서의 다짐에너지에 따른 다짐 효과 평가’에 종합하여 한국지반환경공학회 학술논문으로 게재하였다.

표 9 표준 A다짐과 수정 D다짐의 시험결과 정리

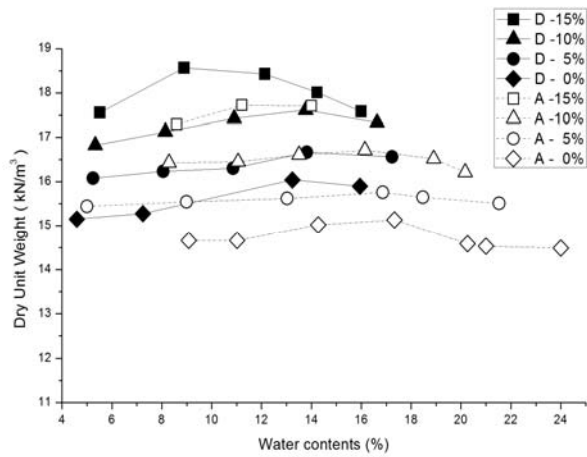
			Sand 100% Fine 0%	Sand 95% Fine 5%	Sand 90% Fine 10%	Sand 85% Fine 15%
A type	18℃	Optimum moisture contents (%)	17.33	16.86	16.15	11.21
		Maximum dry unit weight (kN/m ³)	15.1333	15.7621	16.7134	17.7236
	-3℃	Optimum moisture contents (%)	13.96	15.28	17.46	14.32
		Maximum dry unit weight (kN/m ³)	14.9788	14.6105	16.3531	16.5268
	-8℃	Optimum moisture contents (%)	17.53	12.26	18.00	17.10
		Maximum dry unit weight (kN/m ³)	14.5992	14.7392	13.6924	13.6197
D type	18℃	Optimum moisture contents (%)	13.24	13.81	13.77	8.89
		Maximum dry unit weight (kN/m ³)	16.0439	16.6669	17.6132	18.5661
	-3℃	Optimum moisture contents (%)	13.50	10.49	14.80	8.49
		Maximum dry unit weight (kN/m ³)	15.2544	16.6354	17.2925	17.7596
	-8℃	Optimum moisture contents (%)	13.42	10.69	10.91	9.05
		Maximum dry unit weight (kN/m ³)	14.3001	15.16054	15.6542	15.1901

① 다짐에너지에 따른 다짐 특성

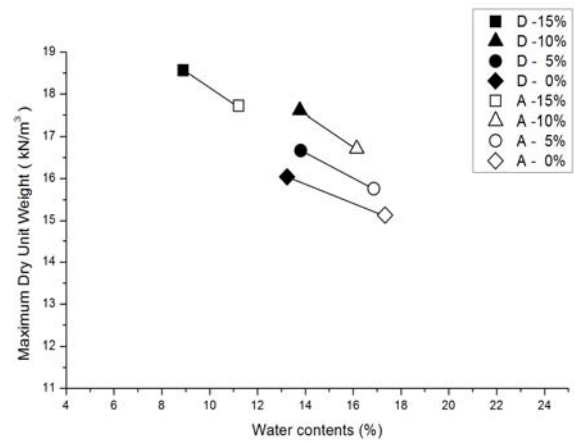
일반적으로 다짐에너지가 클수록 최대건조단위중량이 증가하고 최적함수비가 감소하여 다짐곡선이 좌측상부로 이동하는 것으로 알려져 있다. 그림 31과 32은 각각의 세립분 함량(0%, 5%, 10%, 15%)에서 다짐에너지의 변화에 따른 최대건조단위중량과 최적함수비의 변화를 온도(18℃, -3℃, -8℃)별로 나타낸 그림이다. 표 9와 그림 31, 그림 32을 통해 시험결과를 분석한 결과, 다짐에너지를 표준 A다짐에서 수정 D다짐으로 약 5배 증가시킬 경우 다짐에너지가 증가함에 따라 최대건조단위중량이 증가하고 최적함수비가 감소하여 다짐곡선이 좌측상부로 이동하는 경향을 볼 수 있었다. 이는 다짐에너지가 증가함에 따라 토립자에 가해지는 힘 또한 증가되며, 마찰저항으로 형성되어있던 토립자의 안정상태가 무너지면서 발생한 결과로 판단된다. 반면 각각의 다짐곡선들이 이동한 정도는 일정하지 않았으며, 이는 영하의 온도에서 다짐에너지에 따른 다짐효과가 일반적인 경향과 일치하지만 생성된 얼음알갱이의 형상과 크기의 불균질성에 의해 다짐효과가 불균일하게 나타난 것으로 판단된다.

② 세립분 함량에 따른 다짐 특성

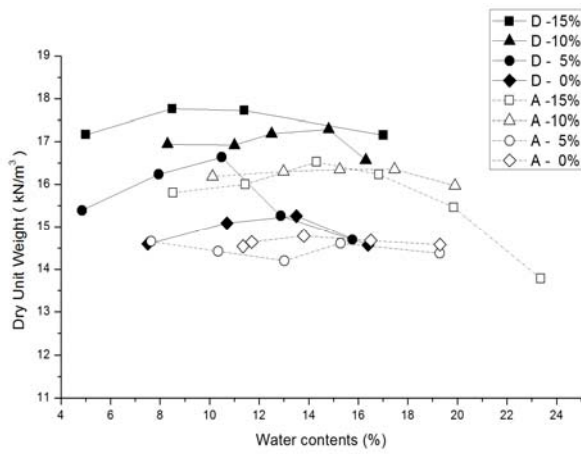
그림 33과 그림 34는 표준 A다짐과 수정 D다짐의 세립분 함량의 변화에 따른 최대건조단위중량과 최적함수비의 변화를 나타낸 그림이다. 조립토의 경우 입도분포가 좋을수록 최대건조단위중량은 증가하고 최적함수비는 감소하는 것으로 알려져 있다(Johnson and Sallsberg, 1962). 표 9와 그림 33, 그림 34를 통해 시험결과를 분석한 결과, -8℃에서 세립분 함량 15%인 경우를 제외한 모든 경우에서 세립분 함량이 증가할수록 최대건조단위중량이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 토립자 사이의 간극이 세립분으로 채워지게 되면서 입도분포가 좋아지는 효과를 얻는 것으로 판단된다. 세립분 함량이 증가함에 따라 최대건조단위중량이 증가하는 경향은 뚜렷하게 확인할 수 있었지만, 최적함수비의 경우 세립분 함량에 따른 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다. 이는 영하의 온도에서 생성된 불균질한 얼음 알갱이들이 토립자와 같은 거동을 하여 입도분포에 영향을 주었기 때문이라 판단된다. -8℃에서 세립분 함량 15%로 실시한 다짐시험결과 최대건조단위중량이 감소한 것 역시 불균질한 얼음 알갱이들의 영향으로 판단된다.



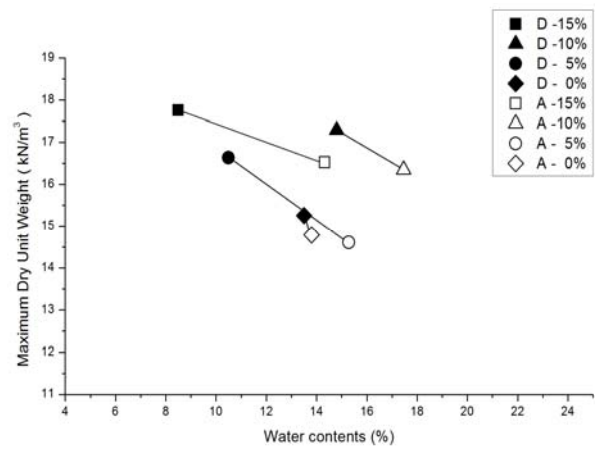
(a) 18°C



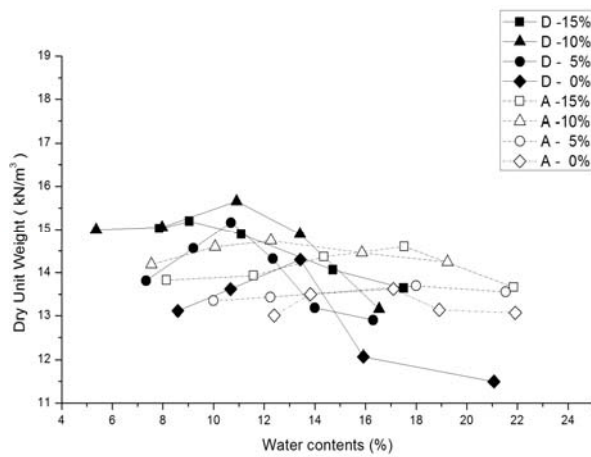
(a) 18°C



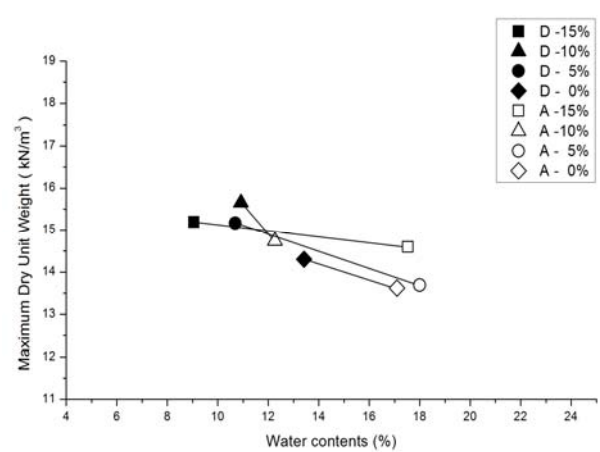
(b) -3°C



(b) -3°C



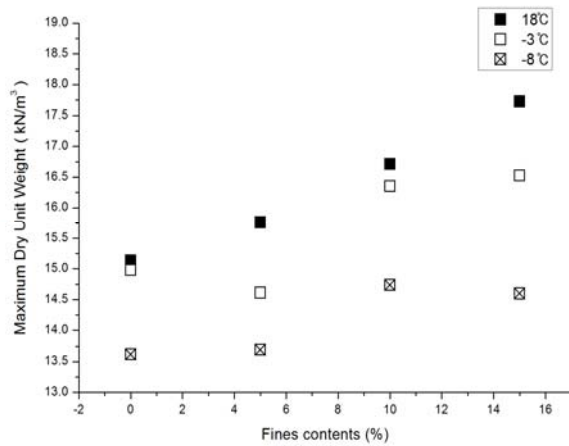
(c) -8°C



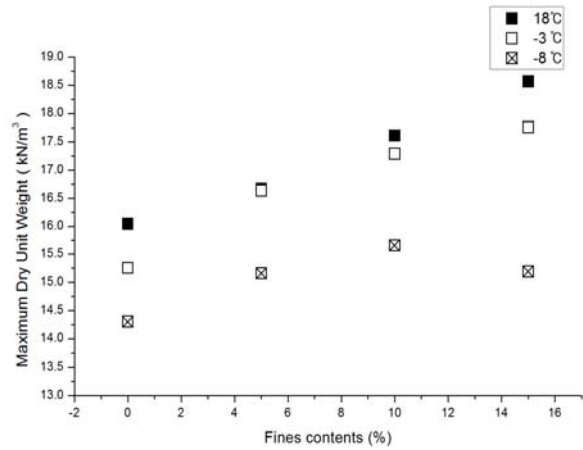
(c) -8°C

그림 31 시험온도별(18°C, -3°C, -8°C)
표준 A다짐과 수정 D다짐의 다짐곡선

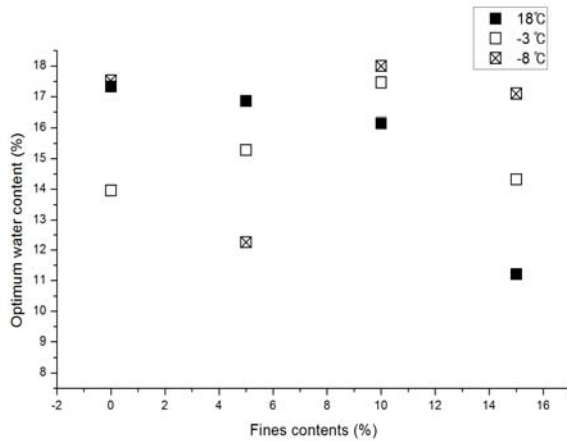
그림 32 시험온도별(18°C, -3°C, -8°C)
최대건조단위중량과 최적함수비의 변화



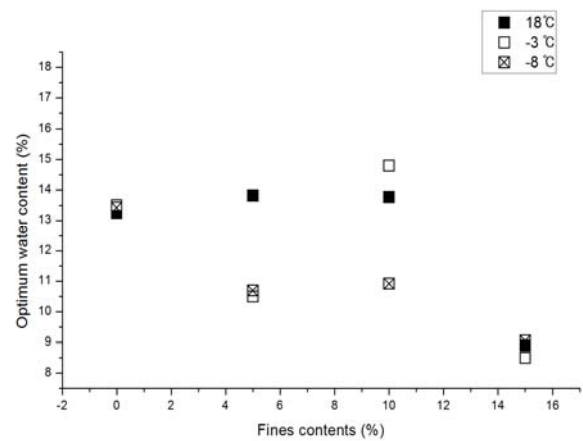
(a) 최대건조단위중량



(a) 최대건조단위중량



(b) 최적함수비



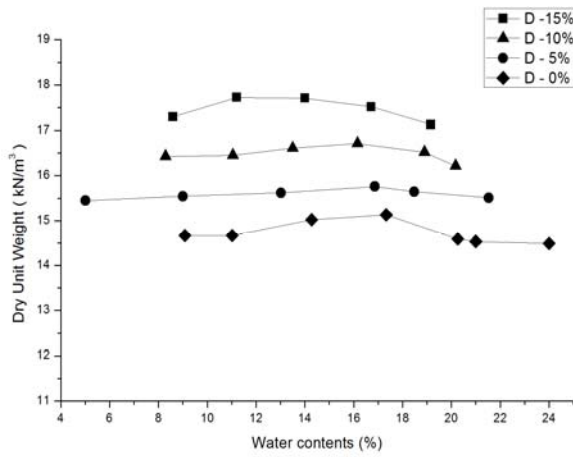
(b) 최적함수비

그림 33 표준 A다짐의 세립분 함량에 따른 최대건조단위중량(a)과 최적함수비(b)의 변화

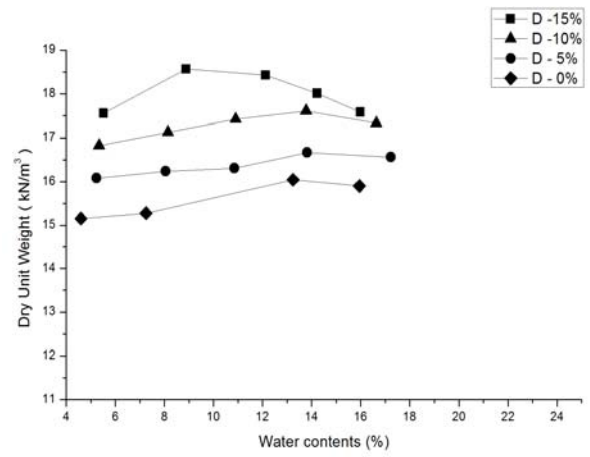
그림 34 수정 D다짐의 세립분 함량에 따른 최대건조단위중량(a)과 최적함수비(b)의 변화

③ 온도에 따른 다짐 특성

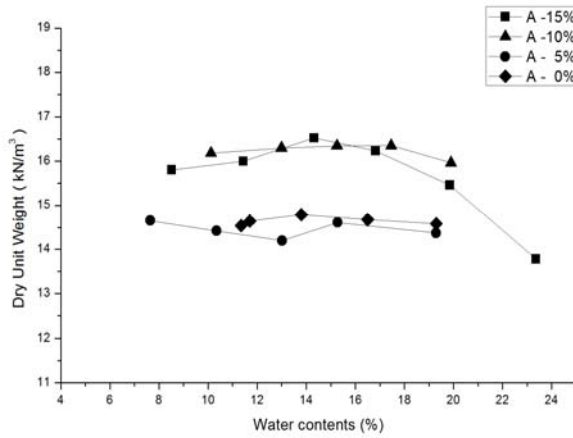
그림 35와 36는 표준 A다짐과 수정 D다짐방법으로 실시한 세립분 함량에 따른 다짐곡선을 온도 (18°C, -3°C, -8°C)별로 나타낸 그림이다. 분석 결과 온도가 낮아질수록 최대건조단위중량이 감소하는 것을 확인할 수 있었으나, 최적함수비의 경우 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다. 온도가 영하로 떨어지게 되면 토립자 사이의 물이 동결되면서 부피가 팽창하고, 생성된 얼음알갱이들이 간극에 채워져 시료의 밀도를 저하시키기 때문에 최대건조단위중량이 감소하는 것으로 판단된다. Hass and Barker(1988)의 함수비와 얼음덩어리 직경과의 관계를 보면, 같은 함수비 조건에서 생성되는 얼음덩어리의 크기나 형태가 모두 다르다는 것을 확인할 수 있다. 또한 물이 동결되면 얼음 알갱이를 생성하는 것 외에도 토립자들을 연결시켜 하나의 큰 덩어리를 형성하기도 하는데, 임의의 시간에서 생성되는 얼음 알갱이와 토립자 덩어리의 형상과 크기 및 생성량은 매우 불규칙하기 때문에 이를 예측하기는 쉽지 않다. 따라서 최적함수비의 경향이 나타나지 않는 것은 영하온도에서 생성되는 얼음알갱이들의 불규칙성 때문인 것으로 판단된다.



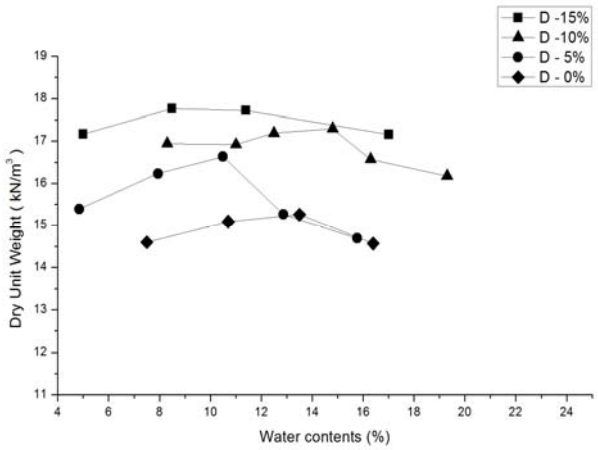
(a) 18°C



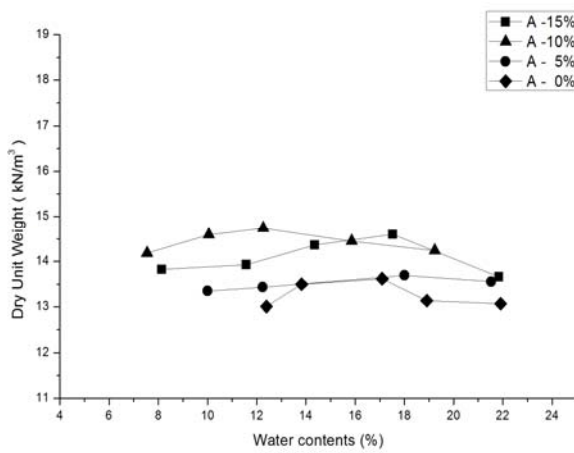
(a) 18°C



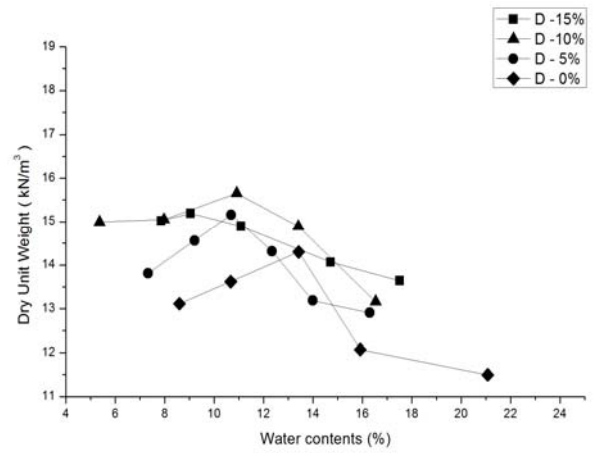
(b) -3°C



(b) -3°C



(c) -8°C



(c) -8°C

그림 35 표준 A다짐에서의 시험온도별(18°C, -3°C, -8°C) 다짐곡선

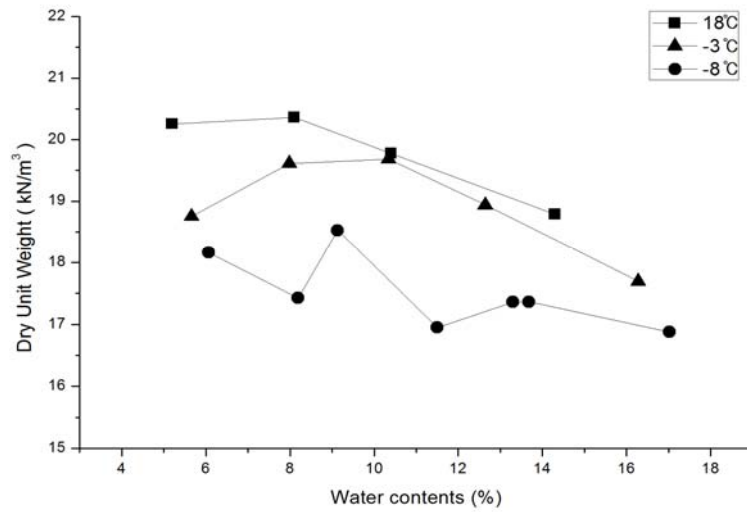
그림 36 수정 D다짐에서의 시험온도별(18°C, -3°C, -8°C) 다짐곡선

④ 동결온도에서 풍화토의 다짐 특성

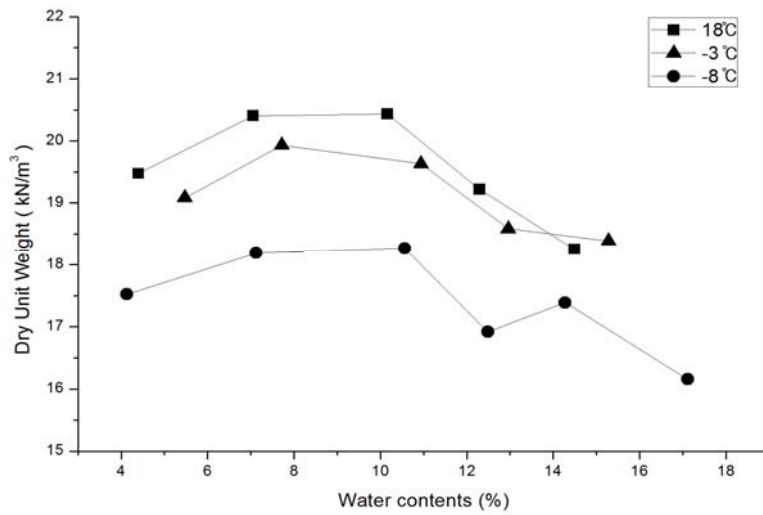
위 실험결과를 통해 획득한 영하온도에서의 다짐특성이 풍화토에서도 적용이 되는지 확인하기 위해 3종류의 풍화토 고양A, 용인A, 용인B에 대해 수정 D다짐을 실시하였다. 표 10은 풍화토 고양A, 용인A, 용인B의 수정 D다짐시험결과를 정리하여 나타낸 표이며, 그림 37은 수정 D다짐을 통해 획득한 풍화토 고양A, 용인A, 용인B의 다짐곡선을 나타낸 그림이다. 시험결과를 보면 고양A, 용인A, 용인B시료 모두 온도가 낮아짐에 따라 최대건조단위중량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 최적함수비의 경향은 발견할 수 없었다. 세 시료의 비중과 세립분 함량이 일정하지 않지만 그 차이가 최대건조단위중량과 최적함수비에 영향을 미칠 만큼 크지 않으므로, 이는 위 실험과 동일하게 얼음알갱이의 생성에 의해 밀도가 낮아져 최대건조단위중량이 감소하였지만, 생성되는 얼음알갱이의 모양 및 형태, 생성량의 불규칙성에 의해 최적함수비의 경향을 발견할 수 없는 것으로 판단된다.

표 10 풍화토의 수정 D다짐시험결과 정리

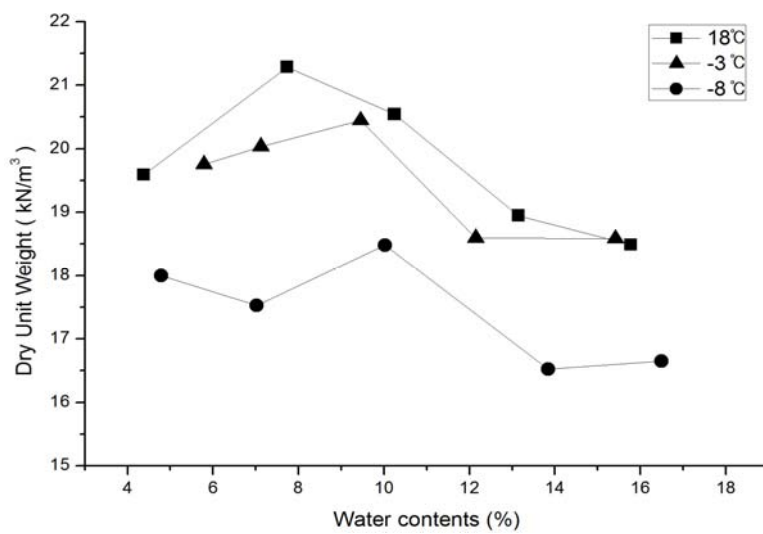
			고양 A	용인 A	용인 B
D type	18℃	Optimum moisture contents (%)	8.10	10.16	7.73
		Maximum dry unit weight (kN/m ³)	20.3607	20.4382	21.2838
	-3℃	Optimum moisture contents (%)	10.34	7.72	9.45
		Maximum dry unit weight (kN/m ³)	19.6828	19.9301	20.4470
	-8℃	Optimum moisture contents (%)	9.13	10.56	10.024
		Maximum dry unit weight (kN/m ³)	18.5262	18.2692	18.4830



(a) 고양 A



(b) 용인 A



(c) 용인B

그림 37 풍화토(고양A, 용인A, 용인B)의 다짐곡선

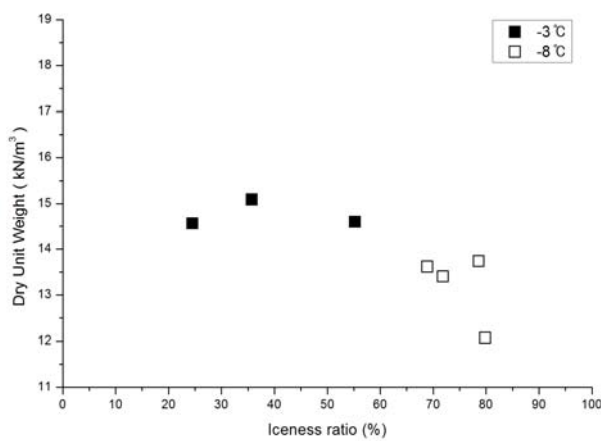
(3) TDR을 이용한 부동수분과 다짐특성과의 관계도출

본 연구에서는 영하온도에서 생성되는 얼음의 양을 나타내는 함빙비와 동결시료의 다짐특성이 매우 밀접한 관계가 있을 것으로 판단하여, 함빙비에 따른 다짐특성을 파악하기 위해 TDR(Time Domain Reflectometry)함수량계를 사용하여 부동수분을 측정하였다. 그림 38은 시험에 사용된 TDR장비와 TDR장비를 이용하여 부동수분을 측정하고 있는 모습을 나타낸 그림이다. 함빙비는 다짐시험을 실시한 시료에 TDR 프로브를 꽂아 체적함수비를 측정하였고, 이를 중량함수비로 치환하여 초기함수비와의 비교를 통해 산정하였다. 부동수분 측정은 영하온도(-3°C , -8°C)에서 실시하였으며, TDR장비는 독일 IMKO사의 TRIME-PICO 32로 정확도가 약 $\pm 3\%$ 이며 0 ~ 100% 범위의 수분함유량을 측정하는 것이 가능한 프로브를 사용하였다. TDR 프로브를 통해 측정된 데이터는 데이터로고를 통해 자동으로 체적함수비를 계산해 준다. 밀도차이에 의해 발생할 수 있는 체적함수비에 대한 오차에 대해서는 결과에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단하여 보정을 실시하지 않았다.

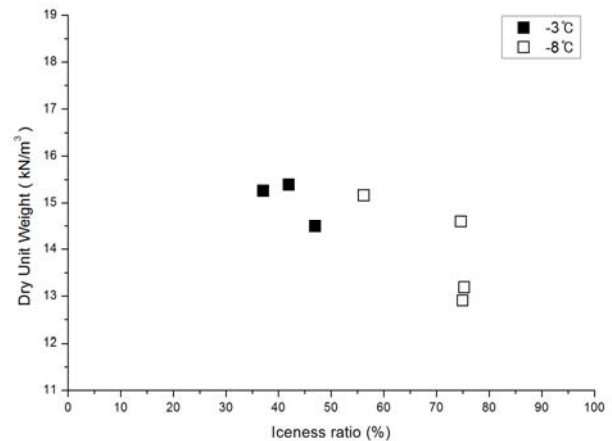


그림 38 TDR장비(좌)와 TDR장비를 이용해 부동수분 측정하는 모습(우)

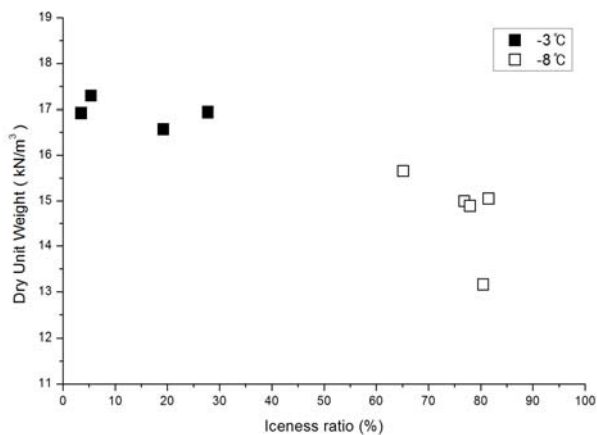
영하온도에서 세립분 함량별 수정 D다짐시험을 실시한 후 TDR(Time Domain Reflectometry)함수량계를 이용하여 부동수분을 측정한 결과를 통해 함빙비를 확인할 수 있었다. 그림 39는 세립분 함량별 온도에 따른 함빙비와 건조단위중량의 관계를 나타낸 그림이다. 함빙비의 분포를 보면 -8°C 에서의 함빙비가 -3°C 에 비해 대체적으로 높은 경향을 나타냄을 확인할 수 있으며, 이는 낮은 온도에 의해 간극속의 물이 더 많이 동결된 것으로 판단된다. 온도에 따른 함빙비의 경향이 두드러지게 나타나는데 반해 세립분 함량에 따른 함빙비의 경우 경향을 파악할 수 없었다. 일반적으로 세립분 함량이 높을수록 부동수분이 많아져 함빙비가 낮아지는 것으로 알려져 있다. 시험결과 -3°C 에서 세립분 함량15%의 함빙비가 세립분 함량 0%의 함빙비에 비해 낮은 경향을 나타내기는 하나, 같은 세립분 함량에서 시료의 함빙비 차이도 최대 30%정도로 나타나 함빙비의 경향을 규정짓기에는 무리가 있다고 판단하였다. -8°C 의 경우에는 세립분 함량 0% 5%, 10%에 비해 15%의 함빙비가 더 높게 나오는 결과를 나타냈다. 이는 시료가 동결온도에 노출된 시간에 따라 생성되는 얼음알갱이의 생성양이나 형상 및 크기의 불규칙성 때문인 것으로 판단되며, 시료의 밀도에 따른 영향도 있을 것으로 판단된다.



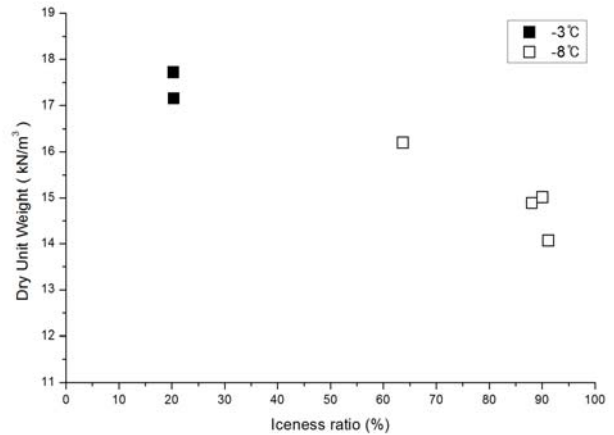
(a) 0%



(b) 5%



(c) 10%



(d) 15%

그림 39 세립분 함량별 온도에 따른 함빙비와 건조단위중량의 관계

표 11은 각각의 다짐곡선에서의 함빙비의 평균을 요약한 표이다. 표 11과 그림 36의 결과를 비교해 보았을 때, -3°C 에서 세립분 함량 10%인 경우 다른 시험들에 비해 함빙비의 평균이 월등히 낮게 나온 것을 확인할 수 있으며 실제 측정된 다짐곡선이 시험 전 예측했던 다짐곡선의 경향에 비해 우측상부로 이동한 모습을 볼 수 있었다. -8°C 의 경우도 마찬가지로 세립분 함량 85%의 경우 다른 시험들에 비해 함빙비의 평균이 높게 나왔으며 실제 측정된 다짐곡선이 시험 전 예측했던 다짐곡선의 경향에 비해 좌측하부로 이동한 모습을 볼 수 있었다. 이는 최적함수비가 증가할 때 최대건조단위중량이 작아지는 일반적인 경향과는 다른 경향이다. 이 또한 다짐시험 과정에서 발생하는 얼음알갱이의 생성양이나 형상 및 크기의 불규칙성 때문인 것으로 판단된다. 시료를 영하온도에서 아무런 간섭이 없이 방치한다면 얼음생성의 불규칙성을 최소화할 수 있을 것이라 여겨지지만 다짐시험과정에서 발생하는 시료의 간극구조의 변화나 마찰 등의 원인에 얼음이 불규칙적으로 생성되는 것을 방지할 수 없을 것으로 판단되며 실제 현장에서도 이러한 불규칙성이 유효하게 작용할 것으로 생각된다. 또한 계획된 시험실 수준의 시험을 통해 함빙비 및 얼음알갱이의 불규칙성을 명확하게 증명하는 것은 힘들 것으로 판단된다.

표 11 세립분 함량에 따른 함빙비의 평균

	Sand 100% Fine 0%	Sand 95% Fine 5%	Sand 90% Fine 10%	Sand 85% Fine 15%
-3°C	38.485	41.987	13.954	23.527
-8°C	74.809	74.972	79.209	89.762

3) 동결융해 거동시험 (일축압축시험)

본 연구에서는 동절기 다짐성토의 융해 시 거동을 파악하기 위해 다짐시험에 의해 최적함수비와 최대건조단위중량으로 다진 풍화토(고양A)를 영하온도(-3°C , -8°C)에서 동결 및 융해를 실시한 후 일축압축시험을 실시하였다. 일축압축시험은 KS F 2314(2013)에 명시되어있는 방법을 사용하여 수행하였다.

① 시료조성

시료의 크기 및 모양은 직경 5cm, 높이 10cm의 원기둥모양으로 결정하였다. 수정 D다짐의 결과를 고려하여 함수비는 최적함수비 8.1%로 결정하였고, 건조단위중량은 일반적인 토공에서의 다짐 시공 시 지방서에 부합하는 상대다짐도 95% 이상을 획득하도록 성형하였다. 또한 시료의 다짐은 3층 다짐으로 실시하여 시료 내의 밀도분포가 균질하도록 조성하였다. 동절기 다짐시공이 해빙기의 융해거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 시험은 상온에서 다진 후 동결 및 융해과정을 실시한 시료와 동결온도에서 다진 후 동결 및 융해과정을 실시한 시료로 분리하여 수행하였으며, 다짐성능의 저하를 확인하기 위해 상온에서 다진 후 동결 및 융해과정을 거치지 않은 시료로 시험을 수행하였다. 동결 및 융해를 위한 영하온도는 다짐시험과 동일한 -3°C , -8°C 로 설정하였으며, 동결 및 융해 사이클은 각각 12시간씩 10회 반복 수행 후 일축압축시험을 실시하였다. 동결 및 융해과정은 각각 냉동체임버와 항온항습기 내에서 실시하여 동결 및 융해과정 동안에 발생할 수 있는 함수비의 감소를 최소화 하였으며, 일축압축시험 후 함수비를 측정한 결과 함수비의 감소율이 2%를 넘지 않았다. 따라서, 함수비의 감소가 매우 미미하여 실험결과에 미치는 영향은 없을 것으로 판단된다. 표 12는 각각의 영하온도에서 함수비의 감소율을 나타낸 표이다.

표 12 영하온도별 함수비의 감소율

	-3°C	-8°C
초기 함수비 (%)	8.10	8.10
동결 및 융해과정 후 함수비 (%)	8.01	7.97
함수비 감소율 (%)	1.11	1.60

② 시험방법

시험은 KS F 2314(2013)를 기준으로 다음과 같은 순서로 진행하였다.

- (1) 시험체를 일축압축시험기에 설치한다. 시험체를 하부 가압판의 중앙에 놓고 시험체에 압축이 가해지지 않도록 상부 가압판을 밀착시킨다. 그 후 변위계, 하중중계의 원점을 조정한다.
- (2) 매분 1%의 압축변형이 생기는 비율을 표준으로 하여 연속적으로 시험체를 압축한다.
- (3) 압축 중에는 압축량 $\Delta H(\text{cm})$ 와 압축력 $P(\text{N})$ 를 측정한다. 압축량과 압축력의 측정 간격은 응력-변형 곡선을 매끄럽게 그릴 수 있을 정도로 한다. 연속 기록을 하지 않는 경우는 압축력이 최댓값까지는 압축량 0.2 mm, 그 이후에는 0.5 mm를 넘지 않는 간격이 바람직하다.
- (4) 압축력이 최대가 되고 나서 계속해서 변형이 2%이상 생기거나, 압축력이 최댓값의 2/3정도로 감소하거나 또는 압축변형이 15%에 도달하면 압축을 종료한다.
- (5) 시험체의 변형, 파괴 상황 등을 관찰하여 기록한다. 압축 종료 후의 시험체의 변형 및 파괴 상황은 그 상태가 가장 뚜렷하게 보이는 방향에서 관찰하여 기록한다. 또한 파괴면이 보이는 경우 그 기울기가 가장 급하게 보이는 방향에서 관찰을 하여 대략 그 각도를 읽을 수 있을 정도로 기록한다. 시험체의 불균질 상황이나 이물질의 혼입 상황 등에 대해서도 관찰하여 기록한다.

그림 40은 시험에 사용된 일축압축시험기와 일축압축 시험 중인 시료의 사진이다. 시험방법은 변형제어방법으로 실시하였으며, 재하속도는 1 mm/min의 속도로 압축을 실시하였다. 시험은 강도가 최대점에 도달한 뒤 감소하다가 일정하게 수렴할 때까지 진행하였으며, 각각의 시험 케이스 당 최소 2회 이상 수행하였다.

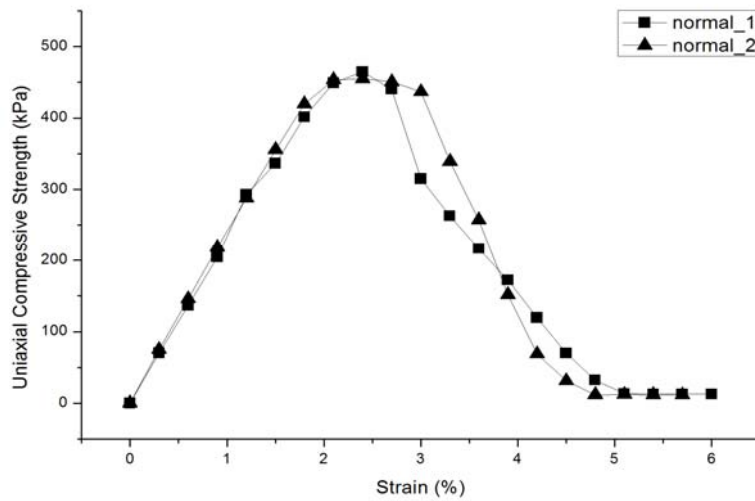


그림 40 일축압축시험기(좌)와 시료가 압축을 받고 있는 모습(우)

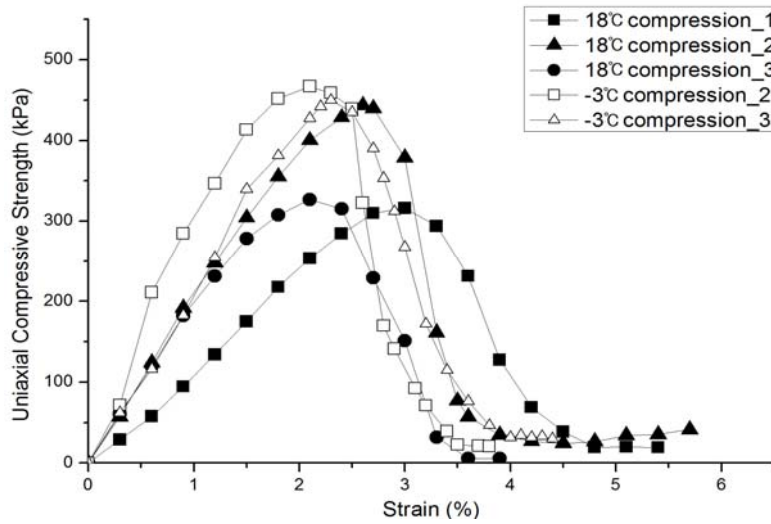
③ 시험결과

본 연구에서는 동결기 다짐시공 된 성토지반의 융해 시 강도변화를 파악하기 위해 -3°C , -8°C 에서 동결 및 융해과정을 진행한 다짐시료의 일축압축시험을 실시하였다. 시료는 수정 D다짐의 결과를 고려하여 함수비는 최적함수비 8.1%로 다졌으며, 건조단위중량은 상대 다짐도를 95% 이상 획득하도록 조성하였다. 그림 41은 일반시료와 영하온도(-3°C , -8°C)에서 동결 및 융해과정을 진행한 시료의 일축압축시험 결과를 나타낸 그림이다. 표 13은 상온에서 다지고 동결 및 융해과정을 진행하지 않은 일반 시료의 일축압축강도를 나타낸 표이며, 표 14는 -3°C , -8°C 에서 동결 및 융해과정을 진행한 시료의 일축압축강도와 강도 감소율을 나타낸 표이다. 강도 감소율은 각각의 시료들의 일축압축강도를 일반시료 일축압축강도의 평균값과 비교하여 나타내었다. -3°C 에서 동결 및 융해과정을 진행한 시료의 경우 강도 감소율이 최대 32.25%까지 발생하였으나, 강도가 1.85% 증가하는 결과를 보이는 경우도 발생하였다. 시험기계의 오차 및 기타요인들에 의한 오차를 고려하였을 때 -3°C 에서의 동결 및 융해과정이 강도저하에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. -8°C 의 경우 강도 감소율이 최소 26.2%에서 최대 45.1%로 강도가 감소하는 경향이 확연하게 나타났다. 시료가 동결 및 융해작용에 반복 노출될 경우 토립자의 풍화로 인한 세립화가 진행되고, 생성된 세립질의 토립자들이 동결 시 얼음알갱이들과 뭉치면서 간극이 증가하는 과정이 반복되어 강도의 저하를 발생시키는 것으로 판단된다.

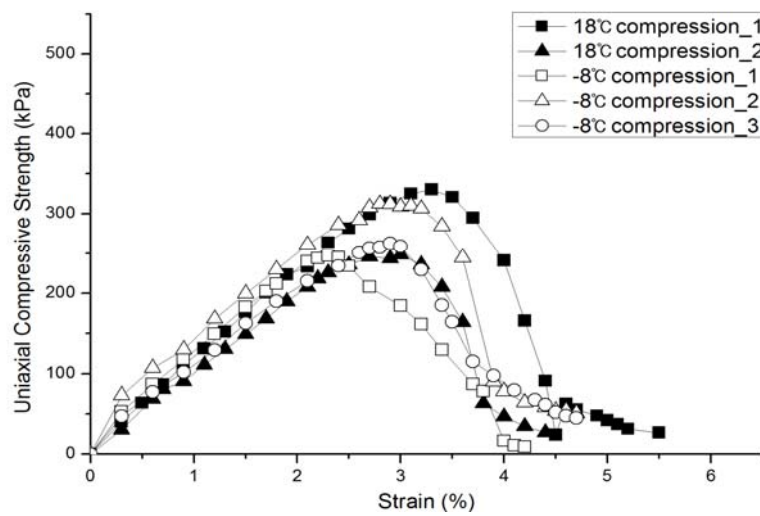
시료성형 시 상온에서 다짐을 수행한 시료와 동결온도에서 다짐을 수행한 시료의 일축압축강도를 비교하였을 때 -3°C 의 경우 동결온도에서 다짐을 수행한 시료의 강도가 더 크게 나오는 결과를 보였으며, -8°C 의 경우는 시료성형 시의 온도에 따른 일축압축강도의 경향을 확인할 수 없었다. 이는 시료의 함수비가 최적함수비 8.1%로 높지 않은 상태라는 점을 고려하였을 때, 함수비가 낮은 상태에서는 영하온도에서 생성되는 얼음알갱이가 강도저하에 미치는 영향이 동결 및 융해과정에 의한 영향에 비해 미미한 것으로 판단된다.



(a) 일반시료



(b) -3°C



(c) -8°C

그림 41 일반시료와 영하온도(-3°C, -8°C)에서 동결 및 융해과정을 진행한 시료의 일축압축시험결과

표 13 일반 시료의 일축압축시험결과

	일축압축강도 (kPa)
상온_1	464.72
상온_2	454.98
평 균	459.85

표 14 동결 및 융해과정을 진행한 시료의 일축압축시험결과

	시료성형과정	일축압축강도 (kPa)	강도 감소율 (%)
-3℃	상온다짐_1	316.14	31.25
	상온다짐_2	443.84	3.48
	상온다짐_3	326.89	28.91
	동결온도다짐_1	467.13	-1.85
	동결온도다짐_2	450.08	2.12
-8℃	상온다짐_1	330.13	28.21
	상온다짐_2	245.73	46.56
	동결온도다짐_1	246.74	46.34
	동결온도다짐_2	312.43	32.06
	동결온도다짐_3	262.67	42.88

4) 불포화 특성시험

영하온도 및 동결 및 융해가 지반의 흡수력 변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 다짐시험의 결과를 바탕으로 다짐된 시료를 영하온도(-3, -8℃)에서 동결 및 융해를 실시한 후 불포화 함수 특성시험과 불포화 일축압축시험을 수행하였다.

(1) 불포화 함수특성시험

영하온도 상태에서의 함수특성시험을 수행하는 것은 명확한 기준이 제시되어있지 않을 뿐 아니라 함수특성시험기의 특성상 제한되는 부분이 많아 현실적으로 불가능하다고 판단하였다. 또한 동결기 다짐시공의 안정성은 동결로 인해 지반의 강도가 증가하는 동결기 보다는 동결된 지반이 융해되는 해빙기에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해빙기 안정성 확보를 위한 동결기 다짐기법 개발을 위하여 영하의 온도에서 지반 재료의 불포화 함수특성을 파악하기 위해 영하온도에서 실시한 다짐시험의 결과를 바탕으로 다짐된 시료의 함수특성시험을 실시하여 동결기에 다짐시공을 실시한 지반을 모사한 시료의 함수특성곡선(Soil-water characteristic curve)을 획득하였다.

① 시료조성

본 연구에서는 영하온도에 따른 불포화 함수특성을 파악하기 위해 건설현장에서 많이 사용되는 지반 재료인 풍화토와 주문진 표준사에 중량비 15%의 카올리나이트를 혼합한 시료를 사용하였다. 모래시료의 경우 시료의 자립이 되지 않는 문제를 가지고 있기 때문에 일축압축시험을 수행할 수 없다. 따라서 불포화 함수특성시험과 불포화 일축압축시험의 결과를 비교하기 위해서 세립질 재료인 카올리나이트를 중량비로 15% 혼합하여 시료가 자립을 할 수 있도록 성형하여 시험을 수행하였다. 풍화토의 경우 다짐시험, 일축압축시험, 체적변형측정에 사용한 고양 A시료를 동일하게 사용하여 시험을 수행하였다. 표 15에 시험에 사용된 풍화토(고양 A)와 15%의 세립분을 혼합한 모래 시료의 기본물성을 요약하였다. 함수특성시험을 위한 시료의 크기는 직경 63mm, 높이 35mm이며, 함수특성시험기와 결합하기 위해 하부에 세라믹스톤이 장착된 Brass ring에 시료를 성형하였다. 시료성형 시 실제 현장의 조건을 최대한 비슷하게 모사하기 위해 시료와 장비는 시험온도에서 충분히 냉각시킨 후 사용하였으며, 시료의 상대다짐도는 일반적인 토공에서의 다짐 시공 시 시방서에 부합하는 상대다짐도 95% 이상을 획득하도록 성형하였다. 그림 42는 세립분 15%가 혼합된 모래시료를 성형한 Brass ring을 나타낸 그림이며, 표 16은 시험에 사용된 풍화토와 세립분이 15% 혼합된 모래시료의 영하온도에서의 다짐시험결과를 요약한 표이다. 흡수력의 변화를 파악하기 위한 동결 및 융해 반복횟수는 10회와 20회로 선정하였으며 각각의 동결 및 융해시간은 12시간으로 동일하게 적용하였다. 시료에 랩을 씌워 공기와의 접촉을 줄여 동결 및 융해과정에서 발생할 수 있는 함수비의 손실을 최소화하였다.

표 15 풍화토와 세립분 15%를 함유한 모래의 기본물성

	Specific gravity	USCS	Maximum dry unit weight [g/cm ³]	Optimum moisture contents [%]
풍화토(고양 A)	2.68	SW	2.075	8.1
세립분 15%를 혼합한 모래	2.60	SP	1.893	8.89



그림 42 세립분 15%를 함유한 모래시료를 성형한 Brass ring

표 16 풍화토와 세립분 15%를 함유한 모래 다짐시험결과

	Maximum dry unit weight [g/cm ³]			Optimum moisture contents [%]		
	18℃	-3℃	-8℃	18℃	-3℃	-8℃
풍화토(고양 A)	2.075	2.006	1.888	8.1	10.34	9.13
세립분 15%를 혼합한 모래	1.893	1.810	1.548	8.89	8.19	9.05

② 시험방법

본 연구에서 실시한 함수특성곡선시험은 ASTM D 6836-02(2008)에 명시되어 있는 방법을 사용하여 시험을 수행하였다. 본 연구에 사용되는 시료의 특성을 고려하여 ASTM D 6836-02(2008)에 명시되어 있는 5종류의 함수특성시험방법 중 Pressure chamber with volumetric measurement 방법을 사용하여 시험을 진행하였으며 시험을 위한 장비는 단국대학교에서 보유하고 있는 압력판 추출 시험기(volumetric pressure plate extractor)를 사용하였다. 표 17에 함수특성시험의 종류를 요약하였으며, 그림 43에 시험에 사용된 압력판 추출 시험기와 시험기의 모식도를 나타내었다.

표 17 함수특성시험의 종류

Test name	Suitable suction range [kPa]	Suitable soil type
Hanging column	0 ~ 80	Coarse soil with little fines
Pressure chamber with volumetric measurement	0 ~ 1500	Finer soils which retain water more tightly
Pressure chamber with gravimetric measurement	0 ~ 1500	Finer soils which retain water more tightly
Chilled mirror hygrometer	100 ~ 500	-
Centrifuge method	0 ~ 120	Coarse soil

시험은 ASTM D 6836-02(2008)을 기준으로 다음과 같은 순서로 진행하였다.

- (1) 각각의 시료의 상대다짐도가 95%이상 획득되도록 Brass ring에 다진다.
- (2) Brass ring 하부에 시료에 따른 세라믹스톤을 결합시킨 후 시료와 함께 포화시킨다. 모래시료의 경우 5bar, 풍화토시료의 경우 15bar의 세라믹스톤을 결합시킨 후 시험을 진행한다.
- (3) 포화된 시료를 압력판 추출 시험기에 결합한 후 시험기에 연결된 모든 관을 포화시킨다. 시료에 압력을 가하면서 피에조미터의 수위변화를 측정하여, 각각의 압력단계에서 감소하는 시료의 체적함수비 및 포화도를 산정한다.
- (4) 각각의 압력은 피에조미터에 관찰되는 수위의 변화가 평형상태에 도달할 때까지 동일한 압력을 지속적으로 가하며, 일정 시간동안 수위가 더 이상 변하지 않는 상태에 도달하면 단계적으로 압력을 증가시키면서 시험을 진행한다.
- (5) 시료의 함수비가 잔류함수비에 도달하면 시험을 중지하며, 시료는 Brass ring에서 꺼내어 함수비를 측정한다.
- (6) 각각의 다짐조건을 고려하여 시료를 성형한 후 (2) ~ (5)의 조작을 반복한다.

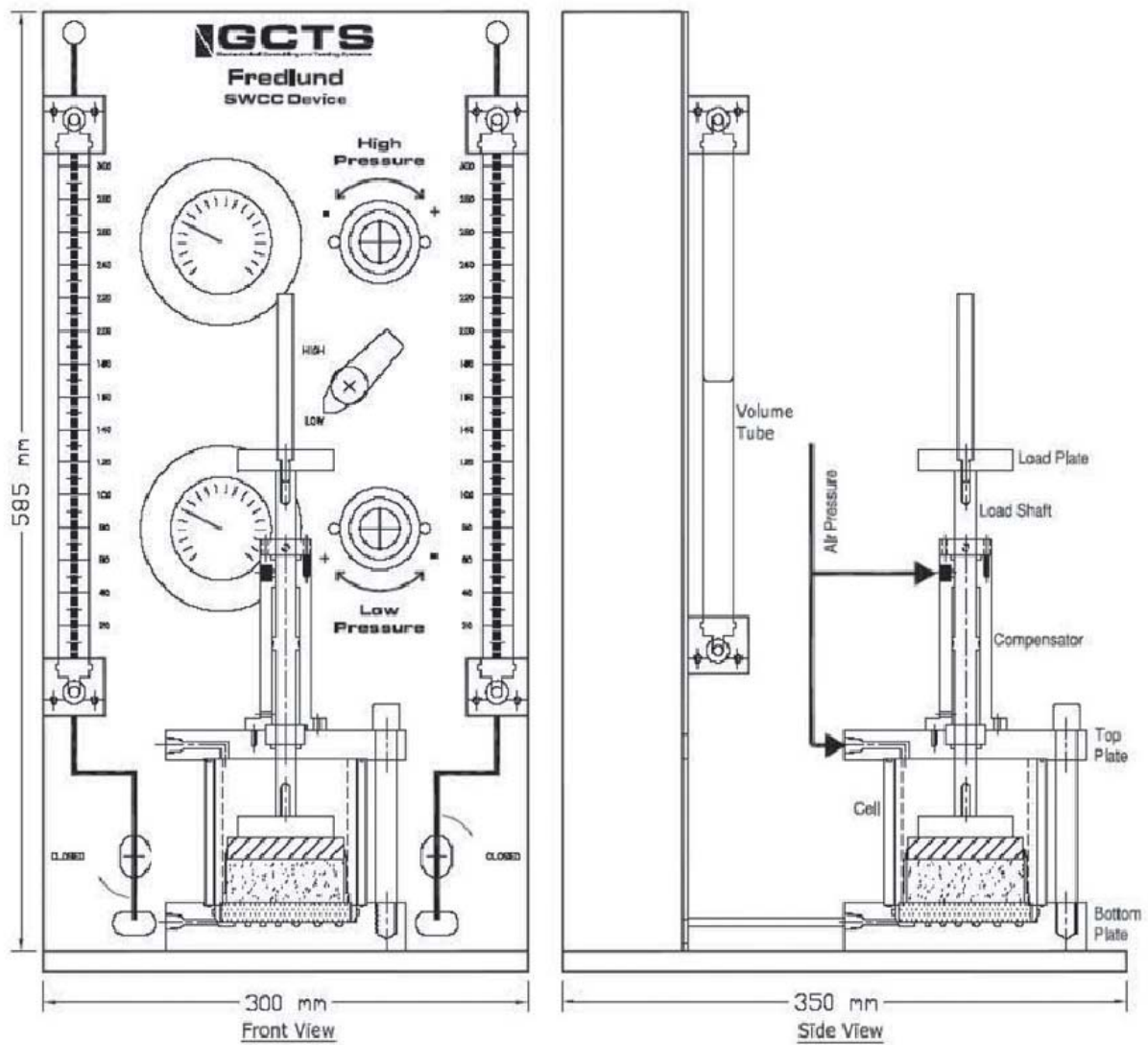


그림 43 압력판 추출 시험기(상)와 시험기의 모식도(하)

③ 함수특성곡선 측정

함수특성곡선은 일반적으로 함수력-체적함수비 또는 함수력-포화도의 관계로 나타낼 수 있으며, 각각의 함수력에서의 포화도 및 체적함수비는 다음 식 17, 18, 19을 통해 산정할 수 있다.

$$w_n = w_{saturation} - \sum_{i=1}^n w_{i\ reduced} \quad \text{식 17}$$

$$S_n = \frac{Gs \times w_n}{e_0} \quad \text{식 18}$$

$$\theta_n = S_n \times n_0 \quad \text{식 19}$$

여기서,

w_n = 중량함수비

$w_{saturation}$ = 포화시 함수비

$\sum_{i=1}^n w_{i\ reduced}$ = n 함수력단계 까지 감소된 함수비

S_n = 포화도

Gs = 비중

e_0 = 초기 간극비

θ_n = 체적함수비

n_0 = 초기 간극률

함수특성시험을 통해 획득한 각 단계별 Suction에 따른 포화도 및 체적함수비를 연속적인 곡선의 모양으로 나타내기 위해 Fredlund and Xing(1994)의 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델을 사용하였다. Fredlund and Xing(1994)의 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델은 3개의 변수로 이루어져 함수특성곡선을 유연한 곡선 형태로 나타낼 수 있으며, 모관함수력을 최대 10⁶kPa까지 고려하여 나타낼 수 있어 실제 시험으로 측정할 수 없는 높은 함수력구간의 함수특성곡선을 잘 구현할 수 있다.

④ 시험결과

영하온도에서 다짐을 실시할 경우 얼음알갱이의 생성으로 인해 다짐효과가 감소하여 상대다짐도가 감소한다. 이는 성토지반의 밀도의 저하를 의미한다. 본 연구에서는 영하온도에서 실시한 다짐시험의 결과를 바탕으로 다짐된 시료의 함수특성시험을 실시하여 동결기에 다짐시공을 실시한 지반을 모사한 시료의 함수특성곡선(Soil-water characteristic curve)을 획득하였다. 시험을 통해 획득한 풍화토와 세립분이 15% 혼합된 모래시료의 불포화 함수특성곡선을 그림 44에 나타내었다. 실제 시험을 통해 측정된 결과를 점으로 나타내었으며, 이를 바탕으로 Fredlund and Xing(1994)의 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델을 사용하여 함수특성곡선을 구현하였다. 시험결과를 보면, -8°C 에서 다짐을 실시한 시료의 포화체적함수비가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 낮은 온도에서 다짐을 실시한 시료일수록 다짐효과가 더 크게 발생하여 밀도가 낮아지면서 발생한 현상으로 판단된다. 흡수력이 증가함에 따라 함수특성곡선의 기울기는 -8°C 에서 다짐을 실시한 시료가 가장 큰 경향을 보였으며 포화체적함수비영역에서는 -8°C 에서 다짐을 실시한 시료의 함수비가 가장 컸지만 잔류체적함수비영역에 도달하였을 때는 체적함수비의 크기가 역전이 되어 -8°C 에서 다짐을 실시한 시료의 함수비가 가장 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 밀도가 낮아지면서 물과 흙입자의 결합력이 감소하였기 때문으로 판단되며, 기존의 문헌연구를 통해 파악한 일반적인 밀도차이에 의한 경향과 일치하는 결과이다.

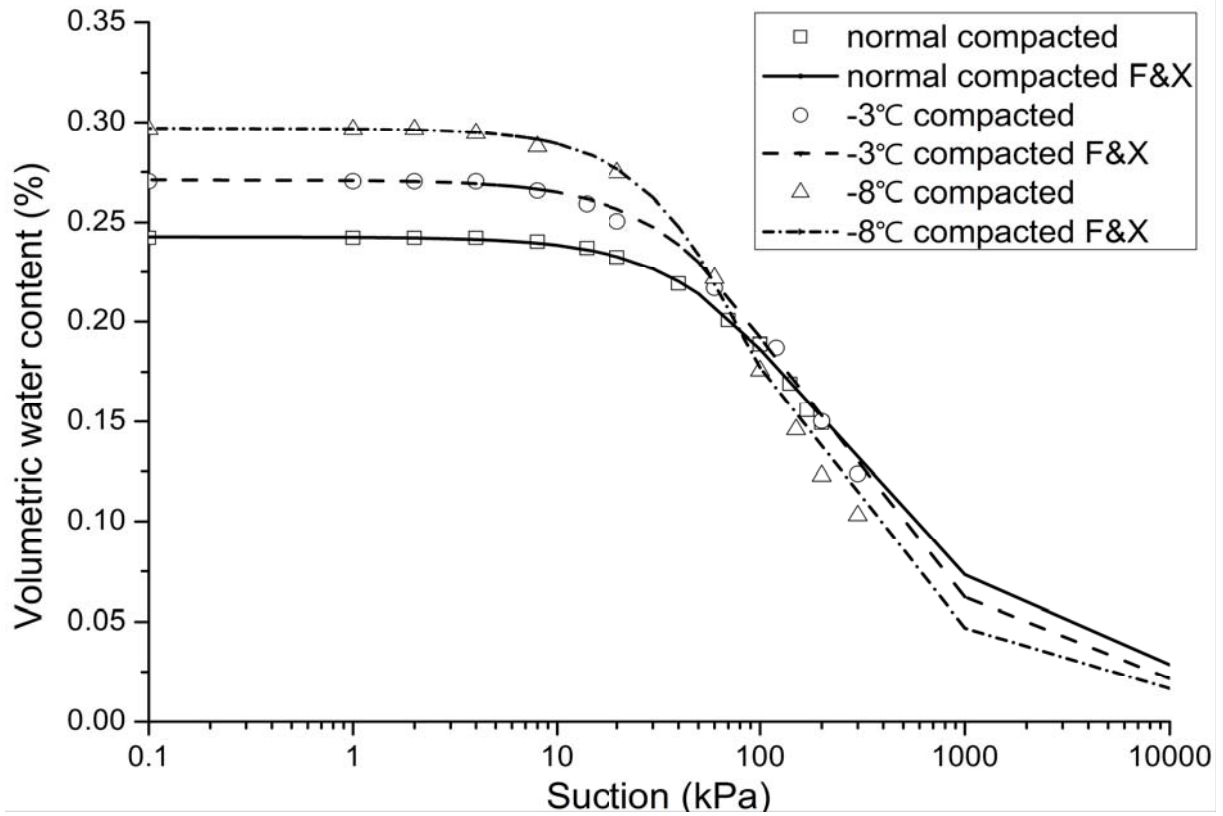
Fredlund and Xing(1994)의 함수특성곡선 맞춤 방정식 모델은 3개의 변수로 이루어져 함수특성곡선을 유연한 곡선 형태로 나타낼 수 있다. 표 18과 표 19에 풍화토와 세립분 15%가 혼합된 모래시료의 동결다짐에 따른 함수특성곡선 맞춤 방정식 변수를 요약하였다. 두 시료 모두 밀도가 낮아질수록 공기함입값과 관련있는 변수 a 는 감소하였으며, 함수특성곡선의 기울기와 관련있는 변수 n , 잔류함수비와 관련있는 변수 m 는 증가하는 경향을 나타내었다.

표 18 풍화토의 동결다짐에 따른 함수특성곡선 맞춤 방정식 변수

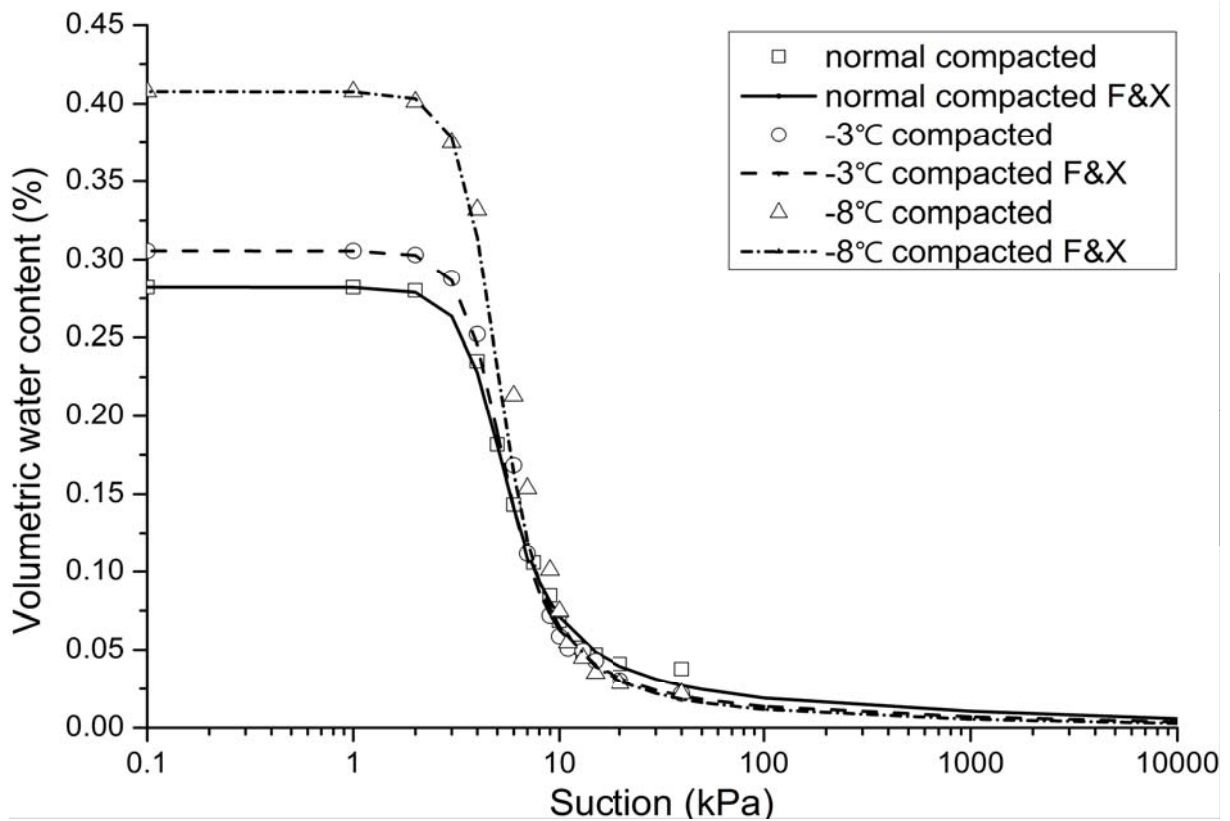
	상온	-3 다짐	-8 다짐
a	110.760	100.800	70.450
n	1.287	1.301	1.481
m	1.049	1.250	1.300

표 19 세립분 15%가 혼합된 모래시료의 동결다짐에 따른 함수특성곡선 맞춤 방정식 변수

	상온	-3 다짐	-8 다짐
a	4.450	4.403	4.342
n	4.551	4.899	5.099
m	1.010	1.199	1.305



(a) 풍화토



(b) 세립분 15% 혼합된 모래

그림 44 동결다짐에 따른 불포화 함수특성곡선

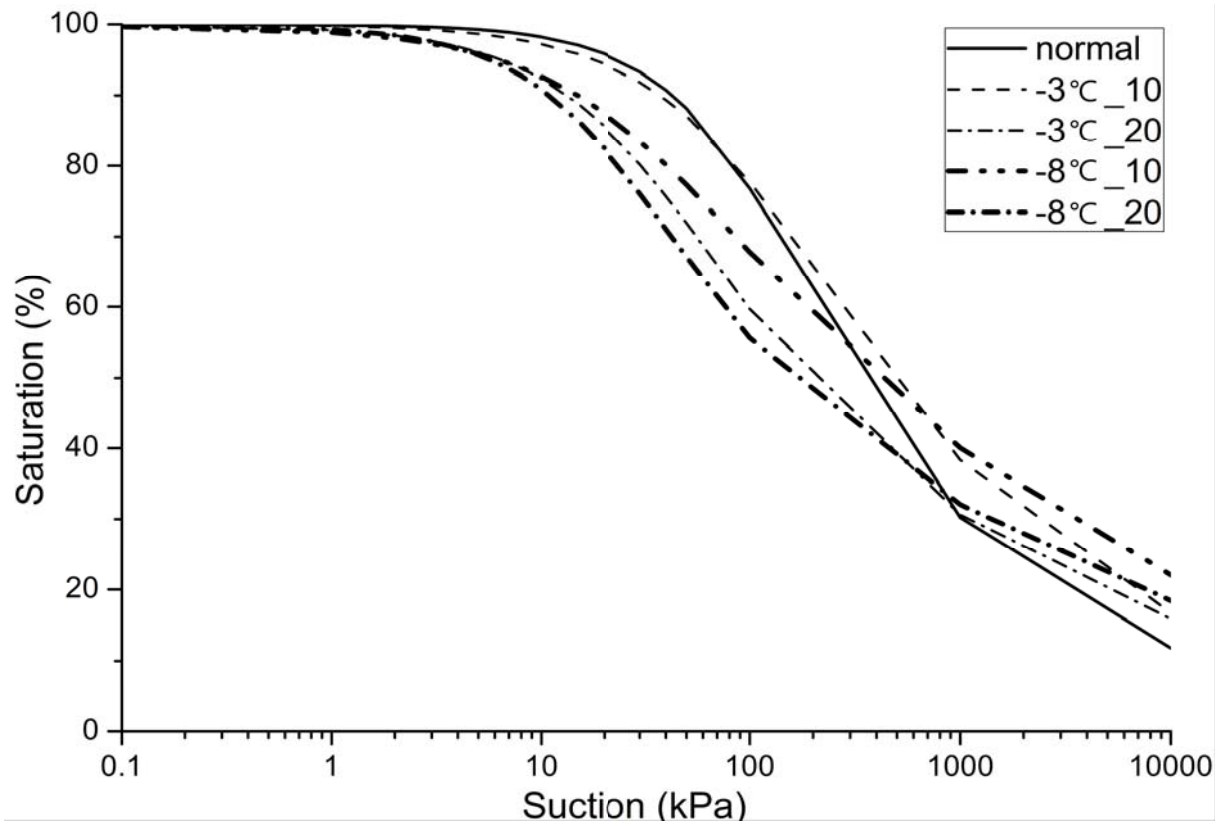
본 연구에서는 동결융해에 따른 함수특성곡선의 거동을 파악하기 위해 동결융해를 10, 20회 반복시킨 시료에 대해 불포화 함수특성곡선시험을 실시하였다. 동결융해에 의한 영향만을 확인하기 위해 시료는 상온에서 실시한 다짐시험의 결과를 바탕으로 성형한 시료로 동일하게 성형하여 진행하였다. 그림 45는 동결융해에 따른 함수특성곡선의 변화를 나타낸 그래프이다. 동결융해에 따른 영향을 좀 더 명확하게 도시하기 위해 포화도-흡수력 그래프로 나타내었다. 풍화토의 경우 동결융해를 적용함에 따라 공기함입값과 함수특성곡선의 기울기가 감소하고 잔류포화도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 동일한 함수비에서 흡수력이 작아진다는 것을 의미한다. 지반의 흡수력은 음의 간극수압을 유발하여 지반의 전단강도를 증가시키는 작용할 하므로 흡수력이 작아진다는 것은 전단강도의 감소를 발생시킬 수 있다. 풍화토에서 흡수력이 작아지는 원인은 동결융해가 반복적으로 진행되면서 세립질의 토립자들이 얼음과 뭉쳐져 시료 내의 간극구조가 흙 입자의 비표면적이 감소하는 형태로 변하여 나타난 현상으로 판단된다. 세립분 15%가 혼합된 모래시료의 경우 동결융해를 적용함에 따라 공기함입값과 잔류포화도가 증가하고 함수특성곡선의 기울기가 감소하는 경향을 보였다. 이는 동일한 흡수력에서 물과 흙입자의 결합력이 더 크다는 것을 의미하며, 동결융해가 반복적으로 작용되면서 발생한 풍화작용에 의해 흙입자의 세립화가 진행되어 나타난 현상으로 판단된다. 또한 두 시료 모두에서 동결온도가 낮을수록 함수특성곡선에 미치는 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 표 20과 표 21에 풍화토와 세립분 15%가 혼합된 모래시료의 동결융해에 따른 Fredlund and Xing(1994) 함수특성곡선 맞춤 방정식 변수를 요약하였다. 풍화토에 동결융해를 실시한 시료의 경우 공기함입값과 관련있는 변수 a , 잔류함수비와 관련있는 변수 m , 함수특성곡선의 기울기와 관련있는 변수 n 모두 감소하는 경향을 보였다. 세립분 15%가 혼합된 모래시료에 동결융해를 실시한 시료의 경우 공기함입값과 관련있는 변수 a 는 증가하였으며 잔류함수비와 관련있는 변수 m 은 감소하는 경향을 보였다. 함수특성곡선의 기울기와 관련있는 변수 n 의 경향은 찾을 수 없었다.

표 20 풍화토의 동결융해에 따른 함수특성곡선 맞춤 방정식 변수

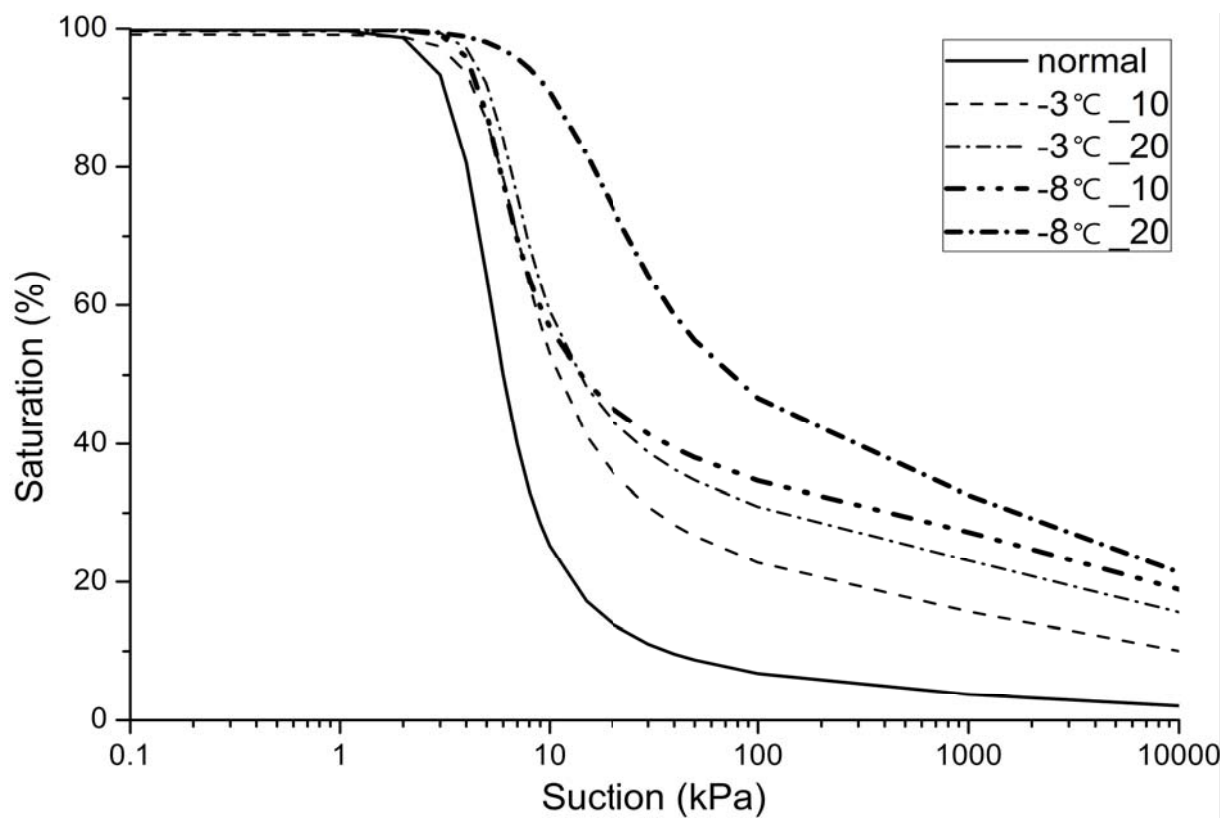
	상온	-3_10회	-3_20회	-8_10회	-8_20회
a	110.760	106.015	31.652	35.008	19.451
n	1.287	1.060	1.107	0.950	1.245
m	1.049	0.950	0.835	0.724	0.682

표 21 세립분 15%가 혼합된 모래시료의 동결융해에 따른 함수특성곡선 맞춤 방정식 변수

	상온	-3_10회	-3_20회	-8_10회	-8_20회
a	4.300	5.247	5.391	4.700	11.211
n	4.551	4.419	5.551	6.600	2.578
m	1.010	0.570	0.421	0.350	0.437



(a) 풍화토



(b) 세립분 15% 혼합된 모래

그림 45 동결융해에 따른 불포화 함수특성곡선

(2) 불포화 일축압축시험

영하온도와 동결 및 융해에 따른 흡수력의 변화가 강도에 영향을 미칠 것으로 판단하여 불포화 일축압축시험을 실시하였다. 불포화 일축압축시험은 기존의 일축압축시험과 비교하였을 때 전 단과정에서 발생하는 시료의 흡수력 변화를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

① 시료조성

불포화 일축압축시험에 사용된 시료는 불포화 함수특성시험과 동일한 풍화토(고양 A)와 주문진 표준사에 중량비 15%의 카올리나이트를 혼합한 시료를 사용하였다. 모래시료인 주문진 표준사에 세립질 재료인 카올리나이트를 중량비로 15% 혼합하여 시료가 자립을 할 수 있도록 성형하여 시험을 수행하였다. 시료크기는 기존의 일축압축시험과 동일한 직경 5cm, 높이 10cm의 크기로 성형하였으며 동결온도와 동결 및 융해 반복횟수 등 모든 시험 조건은 불포화 함수특성곡선시험과 동일한 조건하에서 시험을 진행하였다.

② 시험방법

불포화 일축압축시험의 경우 명확한 기준이나 시험방법이 정해져 있지 않으므로 KS F 2314(2013)에 명시되어있는 기존의 일축압축시험을 참고하여 다음과 같은 순서로 시험을 진행하였다.

- (1) 포화된 세라믹스톤에 간극수압계를 연결시킨 후 불포화 일축압축시험기에 장착한다.
- (2) 시험체를 일축압축시험기에 설치한다. 시험체를 하부에 있는 세라믹스톤의 중앙에 놓고 멤브레인을 씌운다. 시험체에 압축이 가해지지 않도록 상부 가압판을 밀착시킨다. 그 후 시험기를 완전조립한다.
- (3) 체적변형측정을 위해 물을 채우고 변위계, 하중중계, 간극수압계의 원점을 조정한다.
- (4) 매분 1%의 압축변형이 생기는 비율을 표준으로 하여 연속적으로 시험체를 압축한다.
- (5) 압축 중에는 변위, 하중, 간극수압, 체적변형을 측정한다. 변위와 하중의 측정 간격은 응력-변형 곡선을 매끄럽게 그릴 수 있을 정도로 한다. 연속 기록을 하지 않는 경우는 하중이 최댓값까지는 변위 0.2 mm, 그 이후에는 0.5 mm를 넘지 않는 간격이 바람직하다.
- (6) 하중이 최대가 되고 나서 계속해서 변형이 2%이상 생기거나, 압축력이 최댓값의 2/3정도로 감소하거나 또는 압축변형이 15%에 도달하면 압축을 종료한다.
- (7) 시험체의 변형, 파괴 상황 등을 관찰하여 기록한다. 압축 종료 후의 시험체의 변형 및 파괴 상황은 그 상태가 가장 뚜렷하게 보이는 방향에서 관찰하여 기록한다. 또한 파괴면이 보이는 경우 그 기울기가 가장 급하게 보이는 방향에서 관찰을 하여 대략 그 각도를 읽을 수 있을 정도로 기록한다. 시험체의 불균질 상황이나 이물질의 혼입 상황 등에 대해서도 관찰하여 기록한다.

그림 46은 시험에 사용된 불포화 일축압축시험기의 사진과 모식도를 나타낸 그림이다. 불포화 일축압축시험기는 일정한 함수비 상태의 불포화 시료를 대상으로 전단시험이 가능하도록 제작되었다. 기존의 일축압축시험기와 달리 공시체의 하단부에 간극수압계를 설치하여 공시체의 흡수력을 측정할 수 있다. 이때 간극수압계로부터 수압의 변화는 곧 흡수력의 변화로 해석이 가능하며 압축시험을 수행하는 동안 하중, 간극수압, 변위, 그리고 압력계를 통한 체적변화 값을 측정하여 간극비의 변화, 포화도 그리고 흡수력의 변화를 알 수 있다. 시험방법은 변형제어방법으로 실시하였으며, 재하속도는 1 mm/min의 속도로 압축을 실시하였다. 시험은 강도가 최대점에 도달한 뒤 감소하다가 일정하게 수렴할 때까지 진행하였으며, 각각의 시험 케이스 당 최소 2회 이상 수행하였다.

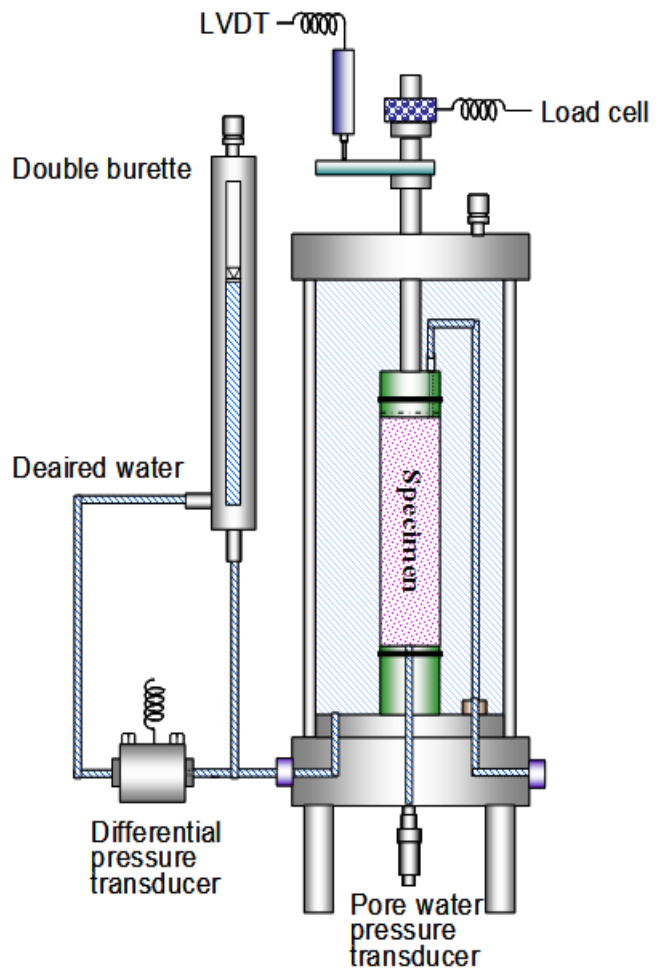


그림 46 불포화 일축압축시험기(상)와 시험기의 모식도(하)

③ 시험결과

영하온도와 동결 및 융해에 따른 흡수력의 변화가 강도에 영향을 미칠 것으로 판단하여 불포화 일축압축시험을 실시하였다. 그림 47은 영하온도에서의 다짐에 따른 불포화 일축압축시험결과를 나타낸 그림이다. 표 22는 상온에서 다지고 동결 및 융해과정을 진행하지 않은 일반 시료의 불포화 일축압축시험결과이며 표 23은 영하온도에서의 다짐에 따른 다짐효과를 모사한 시료의 불포화 일축압축시험결과이다. 영하온도에서 다짐을 실시함에 따라 발생하는 다짐효과의 감소를 모사하기 위해 시료는 영하온도에서의 다짐시험결과를 고려하여 성형하였다. 시험결과 두 시료 모두에서 강도와 강성이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 세립분 15%가 혼합된 모래의 경우 일반시료 자체가 강도가 낮고 느슨한 재료여서 -3°C 에서의 다짐시험결과를 바탕으로 성형한 시료의 강도감소율이 50%를 넘었으며 -8°C 에서의 다짐시험결과를 바탕으로 성형한 시료의 경우 시료의 자립이 불가능하여 시험을 수행할 수 없었다. 반면, -3°C 에서 다짐된 지반을 모사한 풍화토의 경우 강도감소율이 10%가 넘지 않아 -3°C 에서의 동결기 다짐에 대한 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단하였으며 -8°C 에서 다짐된 지반을 모사한 풍화토의 경우 강도감소율이 약 60%로 강도감소가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 불포화 함수특성시험결과를 통해 각각의 시료의 흡수력을 파악한 결과 영하온도에서 다짐을 모사한 시료의 흡수력이 일반 시료보다 큰 것을 확인하였다. 불포화 일축압축시험기를 통해 획득한 각각의 시료의 초기 흡수력을 표 24에 요약하였으며 함수특성시험의 경향과 동일하게 영하온도에서 다짐을 모사한 시료의 흡수력 큰 것을 확인할 수 있다.

표 22 일반 시료의 불포화 일축압축시험결과

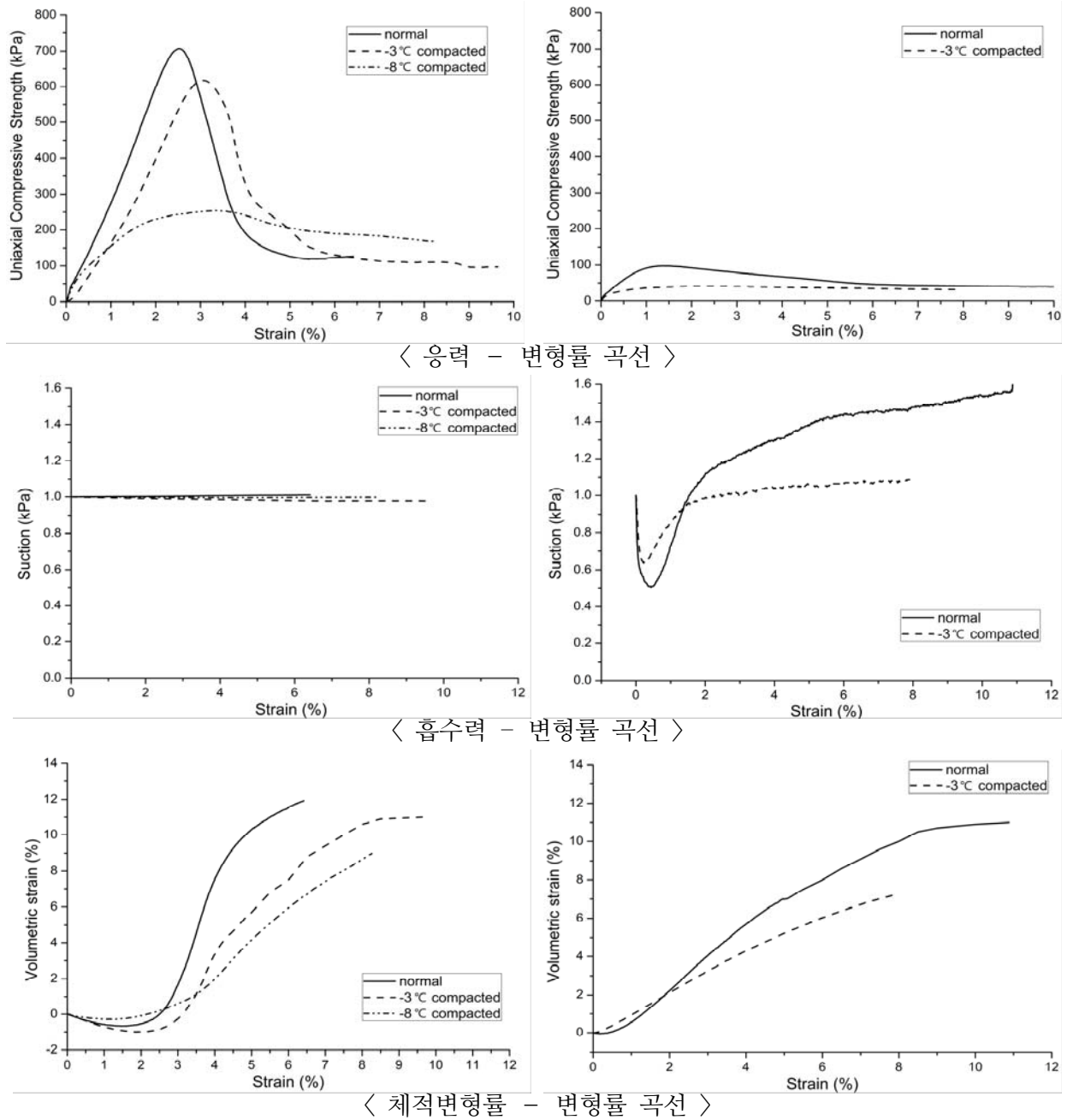
시료명	일축압축강도 (kPa)	
	풍화토	세립분 15%가 혼합된 모래
상온_1	707.314	97.557
상온_2	618.832	88.884
평 균	663.073	93.221

표 23 영하온도에서의 다짐에 따른 불포화 일축압축시험결과

시료명	풍화토		세립분 15%가 혼합된 모래	
	일축압축강도 (kPa)	강도감소율 (%)	일축압축강도 (kPa)	강도감소율 (%)
-3°C 다짐	617.921	6.81	40.399	54.55
-8°C 다짐	254.109	61.68	—	—

표 24 영하온도에서의 다짐에 따른 초기흡수력

	풍화토			세립분 15%가 혼합된 모래		
	일반시료	-3다짐 시료	-8다짐 시료	일반시료	-3다짐 시료	-8다짐 시료
초기 흡수력 (kPa)	88.13	89.39	90.77	2.78	2.88	—



(a) 풍화토

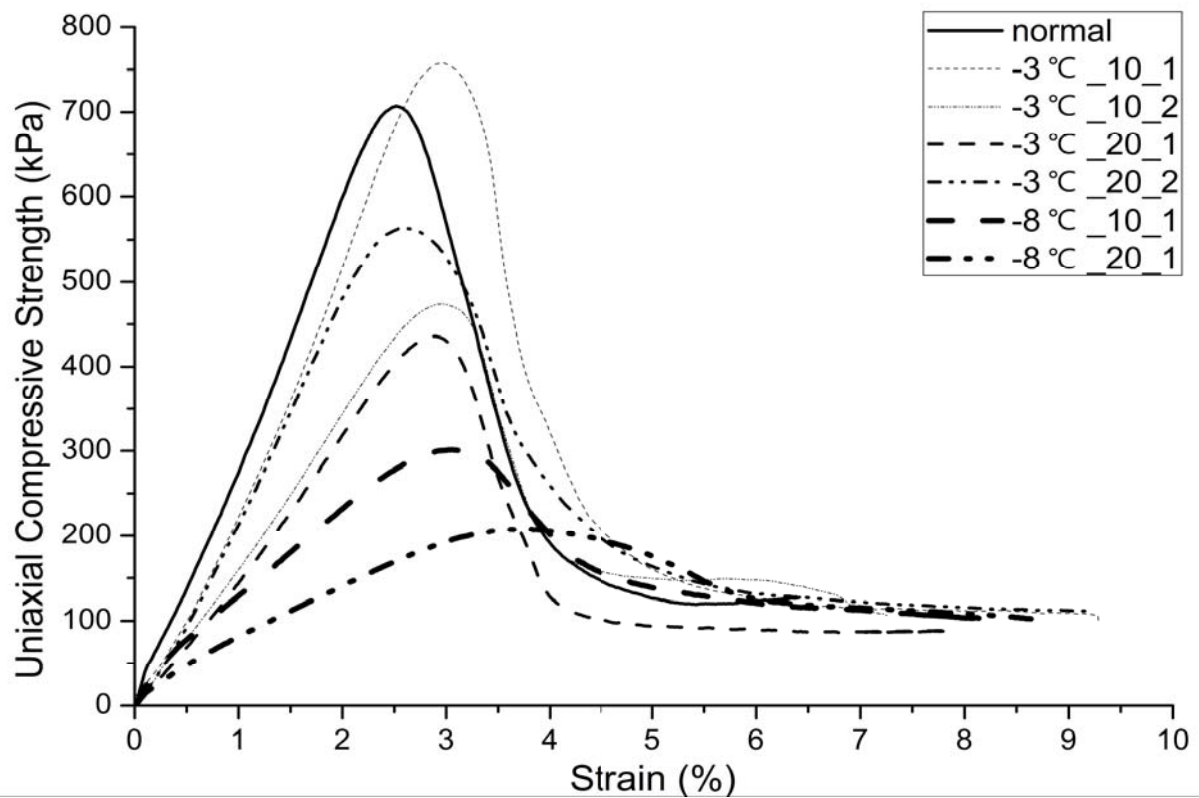
(b) 세립분 15% 혼합된 모래

그림 47 영하온도에서의 다짐에 따른 불포화 일축압축시험결과

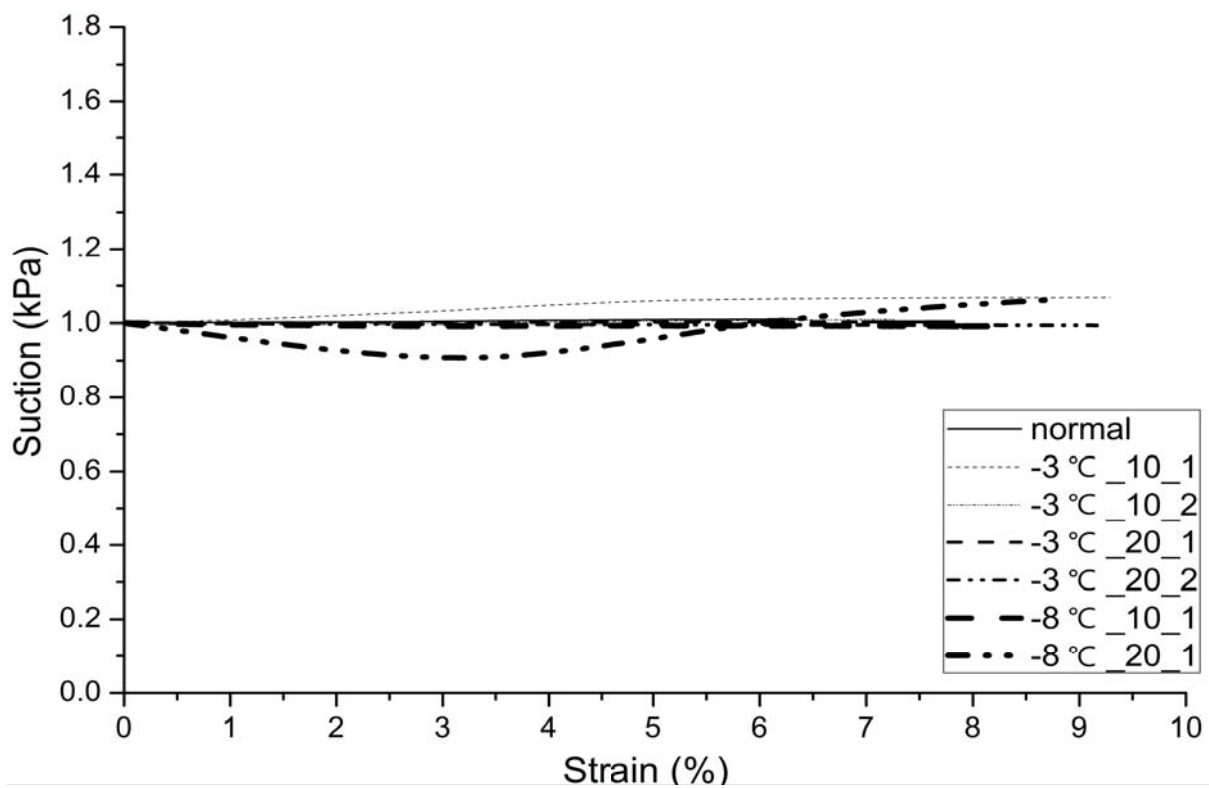
표 25는 영하온도(-3℃, -8℃)에서 동결융해과정을 진행한 시료의 불포화 일축압축강도와 강도 감소율을 나타낸 표이며 그림 48과 49는 풍화토와 세립분 15%가 혼합된 모래의 동결융해에 따른 불포화 일축압축시험결과를 나타낸 그림이다. 강도 감소율은 각각의 시료들의 일축압축강도를 일반시료 일축압축강도의 평균값과 비교하여 나타내었다. 풍화토의 경우 -3℃에서 동결 및 융해과정을 진행한 시료의 경우 강도 감소율이 최대 29.59%까지 발생하였으나, 강도가 22.435% 증가하는 결과를 보이는 경우도 발생하였다. 일축압축시험의 불확실성 및 시험기계의 오차 등에 의한 오차를 고려하였을 때 -3℃에서의 동결 및 융해과정이 강도저하에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단되며 동결융해 반복횟수의 영향도 미미한 것으로 판단된다. 세립분이 15% 혼합된 모래시료의 시험결과도 강도감소율이 최대 14.59%까지 발생하였으나, 강도가 15.75까지 증가하는 경우도 발생하여 풍화토의 거동과 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 반면 -8℃에서 동결 및 융해과정을 진행한 시료의 경우 융해 시 강도감소가 뚜렷하게 나타났으며 동결융해 반복횟수가 증가함에 따라 강도감소가 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 두 시료 모두 강도감소율이 50%를 넘어가는 것을 보아 -8℃이하에서 동결다짐을 실시할 경우 다짐효과가 상당히 감소하며 동결융해에 따른 강도저하가 해빙기 구조물의 안전성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 불포화 함수특성시험의 결과에 따르면 동결융해가 진행될수록 풍화토의 흡수력은 감소하고 모래시료의 흡수력은 증가하는 것을 알 수 있었다. 함수특성시험에서 측정된 흡수력과 일축압축시험의 흡수력은 시료크기, 흡수력 측정방법의 차이 등에 의해 동일한 값을 보이지는 않는다. 하지만 불포화 일축압축시험에서 측정된 풍화토의 초기 흡수력을 보면 -3℃의 경우 초기 흡수력의 변화가 거의 없지만 -8℃의 경우 초기 흡수력의 감소를 뚜렷하게 확인할 수 있어 동결융해에 따른 흡수력변화의 거동은 일치함을 확인하였다.

표 25 동결 및 융해과정을 진행한 시료의 불포화 일축압축시험결과

사용시료	동결융해과정	일축압축강도 (kPa)	강도 감소율 (%)	초기 흡수력 (kPa)
풍화토	-3℃ 동결융해 10회_1	757.616	-22.43	72.864
	-3℃ 동결융해 10회_2	473.896	23.42	89.698
	-3℃ 동결융해 20회_1	435.725	29.59	90.827
	-3℃ 동결융해 20회_2	563.535	8.94	92.529
	-8℃ 동결융해 10회_1	301.499	51.28	72.611
	-8℃ 동결융해 20회_1	207.838	66.41	46.054
세립분 15%가 혼합된 모래	-3℃ 동결융해 10회_1	81.317	12.77	1.483
	-3℃ 동결융해 10회_2	107.903	-15.75	4.735
	-3℃ 동결융해 20회_1	79.617	14.59	2.595
	-3℃ 동결융해 20회_2	106.373	-14.11	2.477
	-8℃ 동결융해 10회_1	40.168	56.91	2.561
	-8℃ 동결융해 20회_1	27.707	70.28	2.797

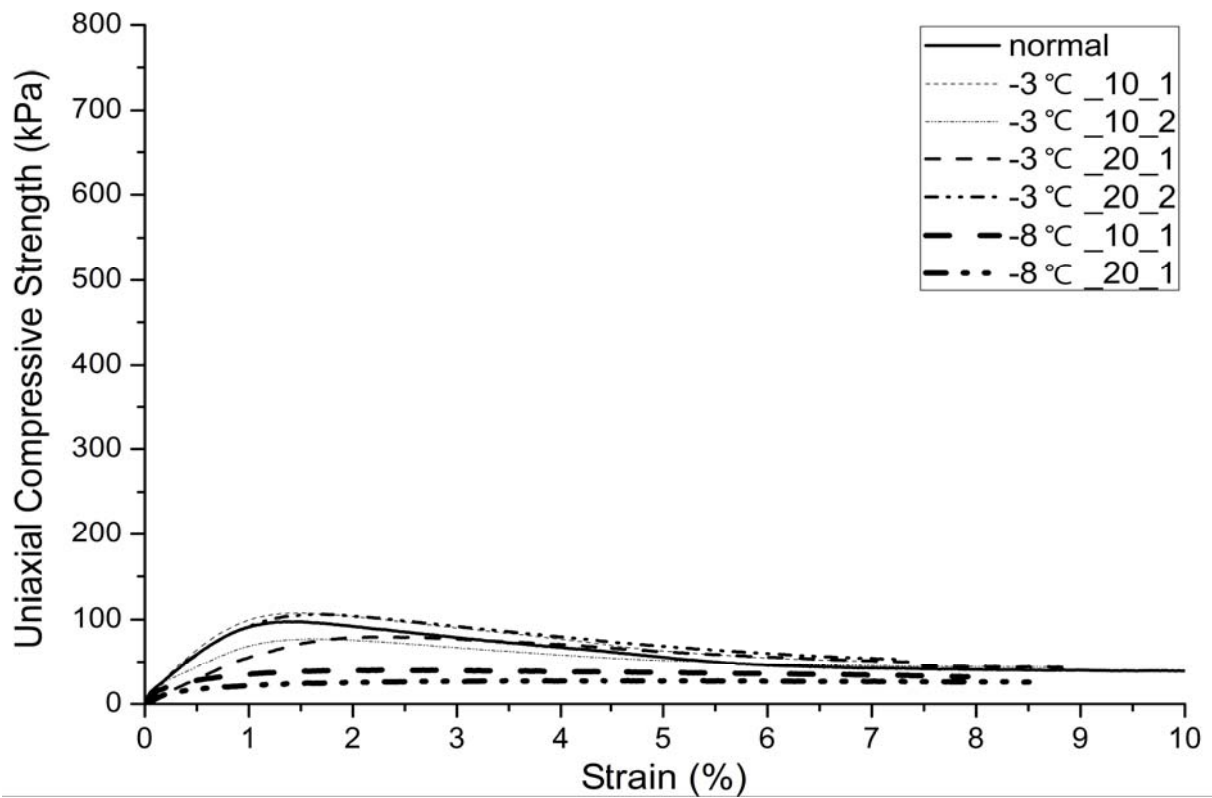


〈 응력 - 변형률 곡선 〉

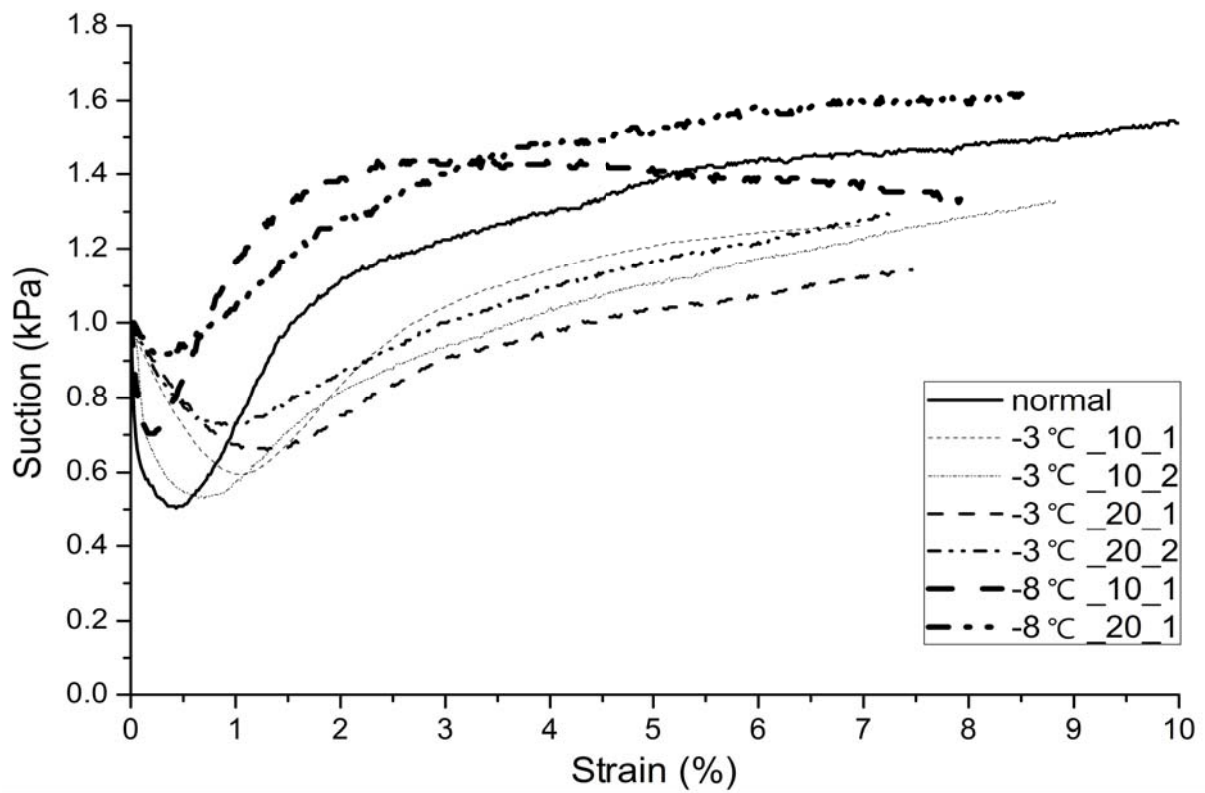


〈 흡수력 - 변형률 곡선 〉

그림 48 풍화토의 동결융해에 따른 불포화 일축압축시험결과



〈 응력 - 변형률 곡선 〉



〈 흡수력 - 변형률 곡선 〉

그림 49 세립분 15%가 혼합된 모래의 동결융해에 따른 불포화 일축압축시험결과

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

1절 주요연구 성과

본 연구에서 실시한 실내 다짐시험을 통한 동결기 다짐특성과 영하온도와 동결 및 융해에 따른 불포화 특성을 고려한 해빙기 융해시의 거동평가를 바탕으로 동결기 지반재료 평가를 위한 실내시험체계를 수립하고, 동결기 다짐시공 시 시방서의 기준에 부합하는 시공품질을 획득하기 위한 다짐시공법을 제시하였다.

1) 동결기 지반 재료 적합성 평가항목 선정

동결기 시공에 사용될 수 있는 지반재료의 적합성을 평가하기 위해 문헌조사(Freitag and McFadden, 1997 ; McFadden and Bennett, 1991)와 실내시험을 바탕으로 몇 가지 항목을 선정하였다.

- ① 성토에 사용되는 흙은 동결 및 동상에 민감하지 않아야 한다.
- ② 성토에 사용되는 흙은 세립토 보다는 조립토를 사용하도록 한다. 세립토를 동결기 성토에 사용할 경우 만족스러운 다짐도를 획득하기 어려우며, 조립토의 경우 엄격한 관리를 통해 어느 정도의 다짐도를 획득할 수 있다.
- ③ 문헌조사와 실내시험결과를 바탕으로 성토에 사용되는 흙은 함수비를 7% 이하로 하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 낮은 함수비에서 결합된 얼음은 다짐에너지에 저항하기에는 매우 얇으며, 흙 입자의 대부분이 동결되지 않기 때문에 상온에서의 흙의 거동과 유사한 거동을 나타낸다.
- ④ 성토에 사용되는 흙에는 육안으로 확인이 가능한 얼음덩어리가 포함되지 않도록 해야 하며, 흙의 함빙비는 20%를 넘지 않도록 해야 한다. 동결기 다짐 시공 시 얼음덩어리는 시공성을 떨어트리는 원인이 되므로, 동결 시 함빙비가 20%이하인 재료를 사용하여 시공 시 생성되는 얼음덩어리의 양을 최소화해야 한다.

위의 조건을 만족하는 재료를 선정하여도 시공 방법과 현장의 상황에 따라서 시공품질이 저하될 수 있다. 이를 고려하여 시공자는 적절한 공법과 현장의 조건에 맞는 시공을 실시하여 적합한 시공품질이 획득될 수 있도록 해야 한다. 또한 시공 후에도 지속적인 유지관리를 통해 문제가 발생되지 않도록 해야 할 것이다.

2) 동절기 지반재료 평가를 위한 실내시험체계 수립

본 연구에는 문헌조사와 실내시험을 통해 동절기 지반재료 평가를 위한 실내시험 체계를 수립하였다. 동절기 지반재료 평가를 위한 실내시험 시 가장 중요한 사항은 시험 조건을 현장 조건과 비슷하게 모사해주는 것이다. 따라서 시험 전, 시험에 사용되는 모든 도구 및 장비, 물, 시료 등을 시험온도에서 충분히 냉각시켜 사용하며, 동결 온도에서의 지반특성을 고려하여 시료 제작 시 발생하는 교란을 최소화 해주어야 한다. 냉동채임버의 허용 온도차는 Baker(1976)에 의해 제안된 값을 따르며, 동결토의 역학적 거동 특성은 영하의 온도에서 생성되는 얼음덩어리에 좌우되므로 시험 함수비로 시료를 제작한 후 얼음덩어리가 생성됨을 육안으로 확인하여 시험을 진행하도록 한다.

3) 동절기 다짐시공 지침 제시

동절기 다짐 시공 시 가장 주의할 사항은 상온과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 건조단위중량을 나타낸다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 영하의 온도에서 표준 A다짐과 수정 D다짐 시험을 통해 획득한 최대건조단위중량과 최적함수비를 분석하여 동절기 다짐시공 시 시방서의 기준에 부합하는 시공품질을 획득하기 위한 지침을 제시하고자 하였다.

- ① 본 연구에서 수행된 다짐시험의 결과를 통해 영하의 온도에서 다짐성능이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 최대건조단위중량의 감소율을 비교해보면 -3°C 의 경우 표준 A다짐에서는 약 4.3%, 수정 D다짐에서는 약 2.8%로 5%미만의 감소를 보였으며, -8°C 의 경우 표준 A다짐에서는 약 12.8%, 수정 D다짐에서는 약 12.3%로 10%이상의 감소를 보였다. 일반 토목구조물의 현장다짐도 기준이 90~95%인 것에 미루어 볼 때 -3°C 의 경우 일부 토목구조물 시공이 가능하나, -8°C 이하의 온도에서는 안정성확보가 불가능하므로 다짐시공을 피하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- ② A다짐에서 D다짐으로 다짐에너지를 약 5배 증가시킨 결과 -3°C 에서는 평균적 7.2%의 최대건조단위중량의 증가를 보였으며, -8°C 에서는 평균 9.6%의 최대건조단위중량의 증가를 보였다. 이는 다짐에너지의 증가로 동결된 지반에 형성된 얼음덩어리들이 부서짐과 동시에 얼음알갱이와 흙입자의 분리가 발생되어 다짐효과가 증가한 것으로 판단된다. 따라서 동절기 다짐시공 시 다짐기준은 수정 D다짐으로 해야 하며, -8°C 이하의 온도에서 다짐 시공 시 시방서에 부합하는 상대다짐도를 획득하기 위하여 다짐에너지를 증가시키는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- ③ 본 연구에서 풍화토를 대상으로 동결 및 융해거동을 파악한 결과, -3°C 에서는 온도에 의한 강도 및 체적변형의 저하가 미미하여 토목구조물 시공이 가능할 것으로 판단된다. 강도의 경우 상온에서의 강도와 비교하였을 때 강도감소율이 10%이내였으며, 체적변형의 경우 동결 및 융해에 의한 체적변형률이 1%이하로 나타났다. 최적함수비 8.1%가 동절기 다짐시공으로 인

한 다짐효과저하에 영향을 미치기에는 낮은 함수비라고 판단된다. 반면, -8°C 의 경우 체적변형률은 1%이하로 동결 및 융해에 의한 효과가 미미하였지만 강도의 경우 최소 26.2%에서 최대 45.1%의 강도감소율을 보여 -8°C 이하의 온도에서는 다짐시공을 피하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 따라서 최적함수비로 상대다짐도 95%이상을 획득할 수 있는 조건 하에서 영하온도 -3°C 까지는 동결기 다짐시공이 가능하다고 판단되지만, -8°C 이하의 온도에서는 다짐효과의 저하가 구조물의 안전성에 영향을 미칠 것으로 판단되어 다짐시공을 실시하기에 부적절하다고 판단된다.

- ④ 본 연구에서 불포화 함수특성시험을 실시한 결과 영하온도에서 다짐을 실시한 지반을 모사한 시료의 경우 포화함수비가 높았지만 함수특성곡선의 기울기가 크고 잔류함수비가 낮아지는 경향을 보였다. 이는 영하온도에서 다짐을 실시할 경우 얼음알갱이의 생성으로 인해 다짐효과가 감소하여 상대다짐도가 감소하며 이는 성토지반의 밀도의 저하를 의미한다. 또한 풍화토시료의 경우 동결융해를 반복적으로 적용시킴에 따라 동일한 함수비에서 흡수력이 감소하는 경향을 보였으며, -8°C 에서 동결융해를 적용한 시료의 흡수력 감소가 더 뚜렷하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 지반의 흡수력은 음의 간극수압을 유발하여 지반의 전단강도를 증가시키므로 흡수력의 감소가 뚜렷한 -8°C 에서 동결융해가 반복된다면 흡수력의 감소로 인해 지반의 안전성에도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 불포화 일축압축시험의 결과를 통해 -8°C 에서 동결융해를 반복시킨 시료의 경우 강도감소율이 50%이상 발생하는 것을 확인할 수 있으므로 -8°C 이하의 온도에서는 다짐시공을 실시하기에 부적절하다고 판단된다.

본 연구에서 제시한 지침은 실내 시험을 통해 획득한 결과를 토대로 작성되었기 때문에 현장의 불확실한 조건들에 대해서는 고려되지 않았다. 추후에 시험결과의 현장적용을 위해서는 현장 시험 및 시험시공을 통하여 검증 및 수정 작업이 불가피 할 것으로 판단된다.

2절 연구 성과 검증

본 연구에서 제안한 동절기 다짐시공 지침을 고려하여 제작된 시료의 해빙기 거동평가를 위해 일축압축시험과 체적변형측정을 실시하였다. 시료는 풍화토(고양 A)를 사용하여 진행하였으며 동절기 다짐시공이 가능할 것으로 제안한 영하온도 -3°C 에서 동결융해를 10회 반복한 후 시험을 수행하였다. 시료는 상대다짐도 95%를 확보하도록 성형하였으며 시료의 함수비는 동절기 지반재료의 적합성을 고려하여 최적함수비 8.1%를 유지할 수 있도록 준비하였다.

1) 일축압축시험

본 연구에서 제안한 동절기 다짐시공 지침을 고려하여 제작된 시료의 해빙기 거동평가를 위해 -3°C 에서 동결 다짐된 시료에 동결융해를 10회 반복한 후 융해 시 강도를 측정하였다. 강도측정을 위해 일축압축시험을 실시하였으며 KS F 2314(2013)에 명시되어있는 방법을 사용하여 수행하였다. 시료의 상대다짐도는 95%이상 획득하도록 조성하였으며 동절기 지반재료의 적합성을 고려하여 수정 D다짐시험의 최적함수비 8.1%로 성형하였다. 이 밖의 모든 조건은 동절기 다짐 성토의 융해 시 거동을 파악하기 위해 수행한 일축압축시험과 동일한 조건으로 시험을 진행하였다. 그림 50은 일축압축시험의 결과를 나타낸 그래프이다. 시험결과 -3°C 에서 동결융해를 진행한 시료의 강도감소율이 최대 32%까지 발생하였지만 강도감소가 매우 적거나 오히려 약간 증가하는 경우도 발생하였다. 이는 일축압축시험의 불확실성 및 시험기계의 오차 등을 고려하였을 때 -3°C 에서의 동결 및 융해과정이 강도저하에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 동절기 다짐시공 지침에서 제시한 영하온도 -3°C 에서 다짐시공 시 강도감소에 대한 안전성을 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

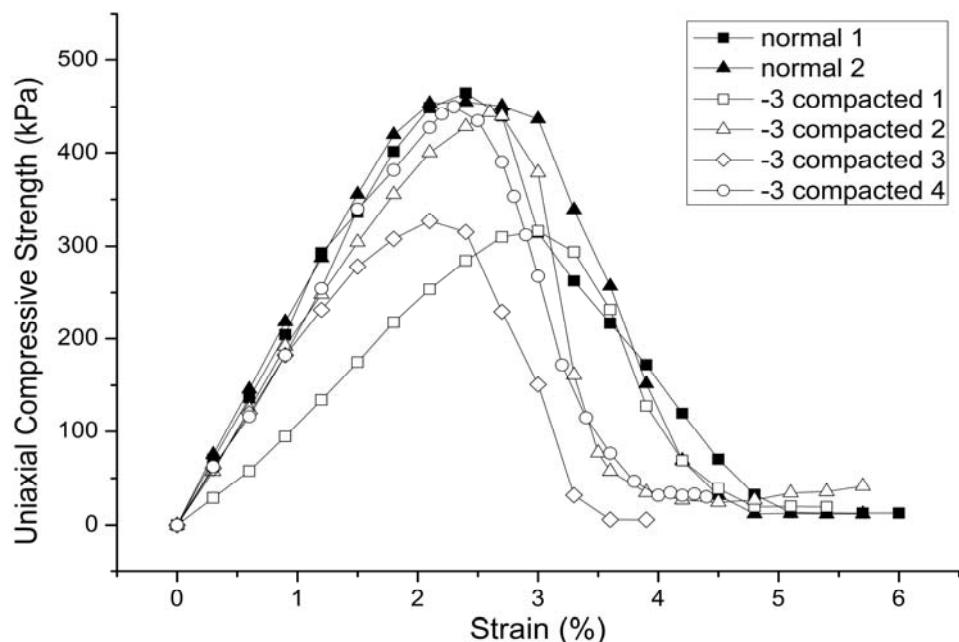


그림 50 일반시료와 -3°C 에서 동결다짐 후 동결융해 과정을 진행한 시료의 일축압축시험 결과

2) 체적변형측정

본 연구에서 제안한 동결기 다짐시공 지침을 고려하여 제작된 시료의 해빙기 거동평가를 위해 동결 다짐된 시료의 용해 시 체적변형을 측정하였다. 체적변형 측정은 표준 A다짐몰드에 최적함수비와 상대다짐도 95%이상을 만족하는 시료를 조성하여 시료 상부에 다이얼게이지를 설치하여 측정을 실시하였다.

① 시료조성 및 시험방법

시료는 직경 10 cm, 높이 12.8 cm의 표준 A다짐몰드에 동결기 기반재료의 적합성을 고려하여 수정 D다짐시험의 최적함수비 8.1%로 다졌으며, 건조단위중량은 상대 다짐도를 95%이상 획득하도록 조성하였다. 그림 51은 시료를 항온항습기에서 용해시키면서 체적변형을 측정하고 있는 모습은 나타낸 사진이다. 다이얼게이지는 ± 0.001 mm의 단위로 측정이 가능하며, 영하온도 (-3°C , -8°C)에서도 작동이 가능한 다이얼게이지를 사용하였다. 시료의 동결 및 용해시간은 일축 압축시험과 동일하게 각각 12시간씩 진행하였으며, 동결 및 용해 사이클은 10회를 실시하였다. 동결 및 용해과정은 각각 냉동채임버와 항온항습기에서 실시하여 동결 및 용해과정 동안에 발생할 수 있는 함수비의 감소를 최소화 하였다.



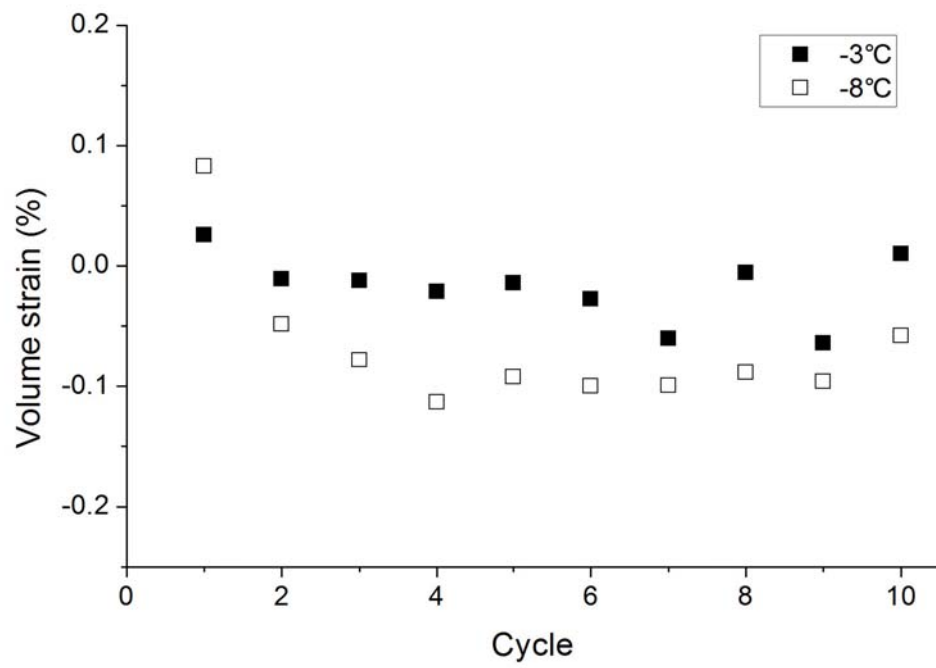
그림 51 동결된 시료를 항온항습기에서 용해시키면서 체적변형을 측정하는 모습

② 시험결과

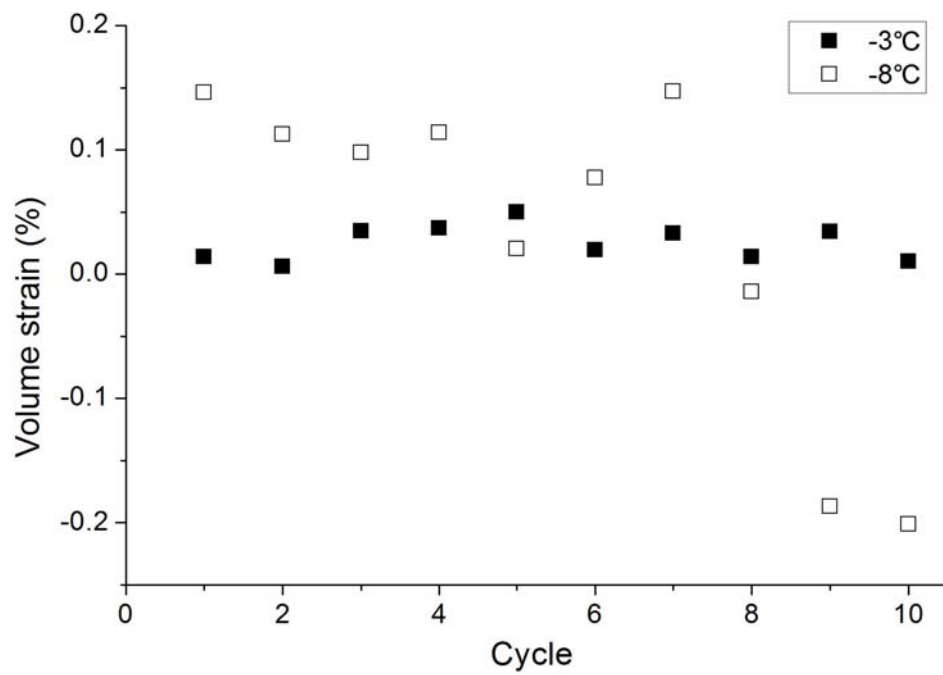
표 26은 -3°C 와 -8°C 에서 동결 및 융해과정을 진행시킨 시료의 동결 시와 융해 시 체적 변형율을 나타낸 표이며, 그림 52는 시료의 동결 시와 융해 시의 체적 변형율을 동결 및 변형 사이클에 따라 나타낸 그림이다. 시험결과를 보면 최초 동결 시 체적이 증가하고 난 이후로 융해 시에 체적이 증가하고 동결 시에 체적이 감소하는 경향을 보였다. 체적변화율은 -8°C 가 -3°C 에 비해 크게 변하는 것으로 나타났다. 반면, 동결 및 융해가 반복됨에 따른 체적변화율 크기의 경향은 나타나지 않았으며, 모든 과정에서 체적변형이 1%이하로 나타났다. 이는 시료를 성형하기 위한 함수비로 설정한 최적함수비 8.1%가 동결 및 융해에 의한 체적변형에 미치는 효과를 나타내기에 충분하지 못한 것으로 판단된다. 이는 눈이나 강우 등의 추가적인 수분의 공급이 없는 낮은 함수비 상태에서는 동결 및 융해과정에 의해 발생하는 체적변형이 작다는 것을 의미한다. 시험결과를 통해 본 연구의 동결기 다짐시공 지침에서 제시한 영하온도 -3°C 에서 다짐시공 시 체적변형에 대한 안전성을 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

표 26 -3°C 와 -8°C 에서 동결·융해를 거친 시료의 체적변형률

사이클 수	체적변형율 (%)			
	동결 시		융해 시	
	-3°C	-8°C	-3°C	-8°C
1회	0.026	0.083	0.014	0.146
2회	-0.011	-0.048	0.006	0.113
3회	-0.012	-0.078	0.034	0.098
4회	-0.021	-0.113	0.037	0.114
5회	-0.014	-0.092	0.050	0.020
6회	-0.027	-0.100	0.020	0.077
7회	-0.060	-0.099	0.033	0.147
8회	-0.005	-0.088	0.014	-0.014
9회	-0.064	-0.069	0.034	-0.187
10회	0.010	-0.058	0.01	-0.201



(a) 동결 시



(b) 융해 시

그림 52 시료의 동결 시(a)와 융해 시(b)의 체적변형률

제4장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

1절 연구성과의 활용방안 및 기대효과

1) 연구결과의 활용방안

지난 22회 소치동계올림픽이 여러 가지 문제점을 안고 개최되었다. 특히 시설 부분에서 많은 우려를 안고 시작하였다. 이러한 부분을 방지하기 위하여 여러 가지 부분에 있어서 만전을 기하고 있으며 2014년에는 경기장과 진입도로 등 11개 시설에 6700억 대의 공사가 발주된다. 이러한 공사들이 성공리에 마치기 위해서는 동절기 공사가 필수적이며 특히 올해와 같은 강원지방의 폭설 및 한파로 인한 영향을 최소화하여야 한다. 본 연구에서 개발된 동절기 다짐기법을 적용하는 부분에는 다소 무리가 있을 것으로 판단되나, 이후 강원지역 개발에 많은 공사가 이루어질 것으로 예상되며 이러한 경우 본 연구에서 개발된 다짐기법이 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

박근혜 대통령 취임 이후, 통일에 대한 전망이 밝아지면서 여러 가지 북한 개발에 대한 고려를 필요로 하는 상황이 오고 있으며, 이에 대한 대비로 건설 분야에서 많은 사전 연구를 수행하고 있다. 통일이 이루어지지 않는다 할지라도 북한의 개발은 머지않은 미래에 이루어질 것으로 예상하며, 강원권 보다 길고 추운 겨울에 공사의 진행이 불가피한 상황으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제안한 동절기 토공 다짐기법의 현장적용성이 확보된다면 북한 개발에 있어서도 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 우리나라는 남/북극 등 영구 동토 지역에서 건설 사업을 추진한 전례가 별로 없기 때문에 영구 동토 지역에서의 건설과 관련된 지반 조사 기술, 설계, 시공, 유지·관리 기술이 부족한 실정이다.

영구 동토 지역에 대한 세계 각국의 관심이 증가하고 있으므로 세계 시장에서 경쟁력을 갖추기 위해 동토 지반의 특성 연구는 반드시 필요하다고 할 수 있다. 본 연구 결과는 극한지에서의 시공 및 설계 시 유용하게 이용될 수 있을 것이다. 또한 우리나라는 2015년부터 30년간 러시아로부터 천연가스를 공급받기로 합의하였다. 이러한 상황에서 국내 건설 회사가 파이프라인 및 부대 시설 등의 공사를 수주하게 되었는데 러시아의 혹한 기후 특성상 동절기 시공이 불가피할 것으로 예상된다. 따라서 설계 및 시공 단계에서 본 연구개발 성과의 활용도가 높을 것으로 판단된다.

2) 기대성과 및 파급효과

(1) 기술적 측면

- ① 국내에서 아직까지 연구되지 않은 온도에 따른 지반재료의 특성을 이용하여 동절기 공사 시 다짐의 품질관리를 통해 시공의 효율성, 경제성 및 신뢰성을 손쉽게 확보할 수 있는 동절기 공사의 품질관리기준 수립에 도움을 줄 것으로 기대
- ② 현재 건조-습윤 이력만을 고려한 불포화토 함수특성 곡선에서 동결-융해 이력을 포함하여 보다 현실에 가까운 지반해석이 가능할 수 있음
- ③ 러시아와의 파이프라인 건설 체결 및 기타 극한지 시공 시 기술적 우위를 선점할 수 있음.

(2) 사회·경제적 측면

- ① 신뢰성 있는 동절기 온도에 따른 지반재료의 이해로 인한 국내외 동절기 공사 시 적합한 토 공기준 마련의 기본 자료 제공
- ② 온도에 대한 지반재료의 특성 이해로 인한 해빙기 시공 사고를 방지할 수 있으며, 구조물의 성능 저하, 도로 및 철도의 해빙기 침하로 인한 균열, 해빙기 사면안정성 악화로 인한 사면 붕괴 등의 인명, 재산상의 피해를 예방
- ③ 다양한 토목공사에 적용이 가능하고 동절기 공사를 가능케 함으로써 공사기간의 단축과 사회적 기회비용의 절감이 가능

2절 추가연구의 필요성

국내에서 아직까지 연구되지 않은 온도에 따른 지반재료의 특성을 이용하여 동절기 공사 시 다짐의 품질관리를 통해 시공의 효율성, 경제성 및 신뢰성을 손쉽게 확보할 수 있는 동절기 공사의 품질관리기준 수립에 도움을 줄 것으로 기대하고 있으며, 이러한 동절기 공사의 품질관리기준 및 시공기준의 수립을 위해서는 본 연구에서 개발된 실험실 수준에서의 성능 평가 및 제정된 기준의 현장 적용성을 판별하여야 한다. Test Bed 형태의 후속 연구를 통하여 본 연구를 통하여 제시된 다짐법을 실제 현장에서 적용하고 이 후 2-3년 동안의 지속적인 모니터링을 통하여 예측한 지반의 성능과 계측된 지반의 성능을 비교하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국내 동절기를 대상으로 하여 -10도의 동절기 기온을 제한하였으나, 본 연구 결과의 영구동토 지역에서의 적용을 위해서는 -10도 이하의 온도에서의 성능 평가 또한 필요할 것으로 판단된다. 또한 동결토의 물리적 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되는 불규칙적인 얼음의 생성에 대해 규명하기 위해서 함빙비에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

제5장 참고문헌

1. 권기철(2004), “국내 노상토의 동결 융해 특성”, 대한토목학회논문집, 제 24권, 2D호, pp. 213~219.
2. 김일현 (1979), “흙다짐에 관한 이론적 연구”, 논문집(THESES OF TAEJON TECHNICAL JUNIOR COLLEGE), 제 25권, pp. 431~439.
2. 노정현 (2008), “불포화 지반의 동결 시 지반-함수특성 변화”, 한국과학기술원 박사학위 논문, pp. 1~99.
3. 박준수 (1981), “흙의 다짐과 투수계수에 관한 연구”, 논문집(THESES OF TAEJON TECHNICAL JUNIOR COLLEGE), 제 28권, pp. 247~254.
4. 백영식 (2007), “강의식으로 풀어쓴 토질역학”, 구미서관, pp. 645~669.
5. 조성정, 민흥기(1987), “Rammer의 중량이 다짐효과에 미치는 영향”, 농업과학연구, 제 5권, 제 1호, pp. 87~96.
6. 최정호, 권기철(2010), “국내외 동상방지층 설계기준에 대한 특성 분석”, 한국도로학회 학술발표 논문집, 제 2010권, 제 3호, pp. 261~266.
7. 한병태, 이영희 (1984), “성토 다짐에 관한 기초적 연구”, 경대토목논총, 제 2권, pp. 105~126
8. 하승우 (2011), “광교 및 화성지역 풍화토의 공학적 특징”, 고려대학교 석사학위 논문, pp. 22~25.
9. KS F 2302 (2002), “흙의 입도시험 방법”, pp. 1~10.
10. KS F 2303 (2000), “흙의 액성한계 · 소성한계 시험 방법”, pp. 1~4.
11. KS F 2308 (2006), “흙의 밀도 시험 방법”, pp. 1~4.
12. KS F 2312 (2001), “흙의 다짐 시험 방법”, pp. 1~6.
13. KS F 2306 (2000), “흙의 함수비 시험 방법”, PP. 1~3.
14. KS F 2314 (2013), “흙의 일축압축 시험 방법”, pp. 1~3.
15. ASTM D 6836-02 (2008), “Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge”, pp. 1~20.
16. Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (2004), “Frozen ground engineering second edition”, John Wiley & Sons, Inc., Canada, pp.21~25.
17. Anderson, D. M. and Morgenstern, N. R. (1973), “Physics, Chemistry and mechanics of frozen ground: a review”, Proceedings of the 2nd International Conference on Permafrost, Yakutsk, U.S.S.R., North American Contribution, pp.257~288.
18. Baker, T. H. W. (1976), “Transportation, preparation, and storage of frozen soil samples for laboratory testing”, ASTM STP 559, pp. 88~112.
19. Bishop, A. W. (1959), “The principle of Effective Stress”, Tecnisk UKeblad, Norwegian Geotechnical Institute, Vol. 106, No. 39, pp. 859~863.
20. Braja M. Das (2005), “Principles of geotechnical engineering 6th edition”, Cengage

Learning, Inc., USA, pp. 113.

21. Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964), "Hydraulic Properties of porous media", Colorado State University Hydrology Paper, No. 3, Fort Collins, Co.
22. Crory, F. E. (1991), "Construction guidelines for oil and gas exploration in northern Alaska", CRREL Rep. 91-21, U.S. Army Cold Regions Res. and Engrg. Lab.(CRREL), Hanover, DC.
23. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), "Stress State Variables for unsaturated soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 103, No. 5, pp. 447~466.
24. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1978), "Stress State Variables for unsaturated soils", Journal of American Society of Civil Engineers, Geotechnical Division, ASCE, Vol. 11, pp. 1415-1416.
25. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), "Equations for the Soil-Water Characteristic Curve", Canadian Geotechnical journal, Vol. 31, No. 4, pp. 521~532
26. Freitag D. R. and McFadden, T. T. (1997), "Introduction to cold regions engineering", ASCE PRESS, New York, pp. 651~661.
27. Haas, W. M.(1988), "Construction materials and field placement." Embankment design and construction in cold regions. ASCE, New York, pp.114~126.
28. Haas, W. M. and Barker, A. E.(1988), "Frozen gravel: A study of compaction and thaw-settlement behavior." Proc., 5th Int. Conf. on cold Regions Engrg., ASCE, New York, pp.308~319.
29. Heiner, A. (1972), "Strength and compaction properties of frozen soil", National swedish institute for building research, Sweden, Doc.11, pp. 71.
30. Hight, J. A., Altachaeffl, A. G. and Lovell, Jr. C. W. (1970) "Low temperature effects on the compaction and strength of sandy clay", Highway Research Record 304, pp. 45~51.
31. Hivon, E. G. and Sego, D. C. (1995), "Strength of frozen saline soils", Canadian Geotech Journal, Vol. 32 No. 2, pp. 336~354.
32. Johnson, A. W. and Sallberg, J. R. (1960), " Factors that influencing field compaction of soil : compaction characteristics of field equipment", Highway Research Board Bulletin 272, pp. 206.
33. Johnson, A. W. and Sallberg, J. R. (1962), "Factors influencing compaction test results", Highway Research Board Bulletin 319, pp. 1~148.
34. McFadden, T. T. and Benett, F. L. (1991), "Construction in cold regions", John Wiley & Sons, New York.
35. Miller, C. J., Yesiller, N., Yaldo, K., and Merayyan, S (2002), Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, Vol. 128, No. 9, pp. 733~742
36. Proctor, R. R. (1933), "Fundamental principle of soil compaction", Engineering-News-Record, New York, Vol. 111, No. 9, pp. 245~248.

37. Richards, B. G. (1965), "Measurement of the free energy of soil moisture by the psychometric technique using thermistors", *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas*, A symposium in Print, Butterworths, Sydney, pp. 39~46.
38. Tart, R. G. Jr.(1983), "Cold regions earthwork.", *Cold regions construction*, ASCE, New York, 32~37.
39. Ting, J. M.(1981), "The creep of frozen sand: qualitative and quantitative models", Research Report R81-5, Massachusetts Institute of Technology Dept. of Civil Engineering, Cambridge, pp. 88~102.
40. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pulfahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996), "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Canadian Geotechnical journal*, Vol. 33, pp. 379~392
41. Van Genuchten, M. Th. (1980), "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil science society of America journal*, Vol 44, No. 5, pp. 892-898.
42. Wilbur, M., Haas, B. D., Alkire, T. J. and Kaderabek (1978), "Increasing the effectiveness of soil compaction at below-freezing temperature", Special Report 78-25, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Directorate of Military Programs Office, Washington, pp.51~52.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 00000사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.