

## 동결 온도에서 다짐효과에 관한 실험적 연구

# An Experimental Study on the Effectiveness of Soil Compaction at Below-Freezing Temperatures

황 범 식<sup>1)</sup> · 채 덕 호<sup>1)</sup> · 김 영 석<sup>2)</sup> · 조 완 제<sup>†</sup>

Bumsik Hwang · Deokho Chae · Youngseok Kim · Wanjei Cho

Received: September 24<sup>th</sup>, 2014; Revised: September 29<sup>th</sup>, 2014; Accepted: October 14<sup>th</sup>, 2014

**ABSTRACT** : Korea has four distinct seasons, showing hot and humidity in summer and cold weather lasted in winter. Domestic research on earth work has been developed according to the seasonal characteristics, and most of research topics have focused on the effect of freezing-thawing on the performance of geo-materials. However, the previous research was performed on the ground compacted at room temperature and therefore, the effect of the sub-zero temperature at the time of construction was not fully investigated. The ground characteristics compacted at freezing temperature can be different from those at room temperature and show different characteristics of strength and deformation caused by freezing and thawing. Therefore, the compaction tests on sandy materials were conducted under various temperature at -3°C and -8°C with various fine contents of 0%, 5%, 10% and 15% in weight fraction. The effectiveness of soil compaction at below-freezing temperatures were compared with the compaction at room temperature at 18°C in terms of the maximum dry unit weight and optimum water contents. Based on the test results, the maximum dry unit weight tends to decrease with the freezing temperature and the relative compaction at -8°C can not be satisfied with general specification standard.

**Keywords** : Below-freezing, Soil compaction, Maximum dry unit weight

**요 지** : 우리나라는 사계절이 뚜렷하며 여름에는 고온다습한 무더운 날씨를 보이고 겨울에는 혹한의 날씨가 지속된다. 이러한 계절적 특성을 고려하여 국내 토공 분야에서는 많은 연구들이 있었으나 대부분의 연구가 지반의 동결·융해에 초점을 맞추어 이루어졌다. 이러한 연구들은 시공 당시의 기온에 따른 지반특성을 반영하지 못하였으며 상온에서 다져진 지반을 대상으로 실시되었다. 그러나 동절기 다짐의 경우 상온에서의 다짐과는 다른 지반상태를 나타낼 것으로 예상되며, 그에 따른 동결·융해로 인한 강도 및 변형 특성 또한 다르게 나타날 것으로 판단되나 이를 고려한 연구는 아직까지 전무한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 -3°C와 -8°C에서 주문진 표준사에 카울리나이트를 0%, 5%, 10%, 15%의 중량비로 혼합하여 다짐시험을 실시하였으며, 상온(18°C)에서의 다짐곡선과 비교하여 온도 및 세립분 함량에 따른 다짐 효과를 살펴보았다. 시험 결과, 동결 온도에서 다짐 시 최대건조단위중량이 감소하는 경향을 보였으며, -8°C 이하에서 다짐 시공 시 시방서의 다짐기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

**주요어** : 동결 온도, 다짐, 최대건조단위중량

## 1. 서 론

우리나라는 유라시아대륙의 동안에 위치하여 사계절이 뚜렷하고 위도에 비해 연교차가 크며 여름에는 고온다습한 북태평양기단의 영향을 받아 무더운 날씨를 보이고 겨울에는 시베리아기단의 영향으로 혹한의 날씨가 지속된다. 이러한 계절적 특성에 맞게 국내 건설 시공 기술은 콘크리트 재료를 중심으로 많은 발전을 이루었으며, 특히 서중콘크리트 및 한중콘크리트와 같은 콘크리트 관련 분야에서 많은 연구가 이루어져 왔다(Kim, 1998; Lee et al., 2006; Choi, 1997).

토공의 경우 기온상승으로 인한 영향보다는 지반의 동결·융해로 인한 영향을 많이 받게 되어 기존에 대부분의 연구들이 이에 초점을 맞추어 진행되어 왔다(Kweon et al., 2010; Shin et al., 2009; Swan et al., 2013). 그러나 이러한 연구들은 시공 당시의 기온에 따른 지반 특성을 반영하지 못하였으며 상온에서 다져진 지반을 대상으로 실시되었다. 반면 동절기 다짐의 경우, 상온에서의 다짐과는 다른 지반상태를 나타낼 것으로 예상되며 그에 따른 동결·융해로 인한 강도 및 변형 특성 또한 다르게 나타날 것으로 판단되나 이를 고려한 연구는 아직까지 전무한 상황이다.

1) Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

2) Korea Institute of Construction Technology

† Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University (Corresponding Author : jei0421@dankook.ac.kr)

현재 동결기 공사는 건설안전본부의 동결기공사 시행지침에 따라 동해의 우려가 있는 공중의 경우 가급적 공사를 지양해야 하며, 공정상 불가피한 경우 세부추진계획을 수립하여 발주부서 및 감리원의 승인 하에 시행하도록 하고 있다. 토공사 시의 경우 불량토, 동결토, 결빙덩어리 및 빙설을 포함한 재료는 사용하지 않도록 하며 가배수로를 설치하여 노면 결빙을 방지해야 한다는 정도의 지침만 있을 뿐 명확한 기준이 없는 실정이다. 토공에서 상당부분을 차지하고 있는 다짐의 경우 70-80년대에 많은 연구들이 이루어졌으나(Park, 1981; Paul, 1980; Taylor & Gill, 1984), 다른 지반공학 분야와는 달리 설계 및 시공기술이 과거의 기술을 그대로 답습하고 있으며 동결기 다짐의 경우 기존과 무관하게 진행되어 해빙기 안전사고의 위험성을 증가시키고 있다. 또한 최근 남극 장보고 과학기지 완공과 러시아 자원개발 협력 등으로 인해 국내 기업의 해외 극지건설시장 진출이 확대되었으며, 2018년 평창 동계 올림픽 개최로 인한 경기장 및 부대시설 신축 등으로 강원권 개발이 활발해지고 많은 공사들이 발주되면서 동결기 공사에 대한 필요성 또한 증가할 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 동결기 영하의 온도가 다짐성능에 미치는 영향에 대해 파악하기 위해 현장의 시공성을 고려하여 상온, -3℃, -8℃에서 다짐시험을 실시하였으며 우리나라의 일반적인 풍화도 세립분함량이 20% 이상(Ha, 2011)이라는 문헌 조사 결과를 토대로 각 온도에서 0, 5, 10, 15%의 세립분 함량에 따른 최적함수비와 최대건조단위중량의 경향을 파악하였다.

## 2. 동결 온도에서 다짐

### 2.1 동결온도에서 흙의 특성

지반이 동결되기 시작하면 일반적인 흙과는 달리 얼음,

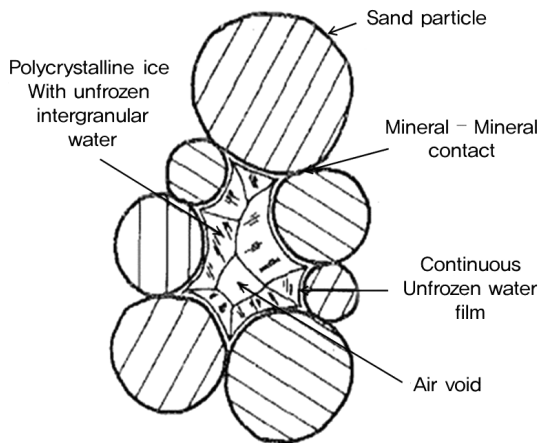


Fig. 1. Two dimensional schematic of the proposed structure of frozen sand (Ting, 1981)

물, 흙 입자, 공극의 4상 구조를 나타내게 된다. Ting(1981)은 동결된 지반의 개념적인 구조를 Fig. 1과 같이 제안하였다. 흙 입자와 얼음간의 경계 및 흙 입자들 사이의 경계면에는 낮은 온도에서도 얼지 않는 부동수분이 존재하게 되고 공극은 다결정의 얼음 알갱이들로 채워지게 된다(Anderson & Morgenstern, 1973). 이러한 얼음 알갱이들로 인해 동결된 지반은 일반적인 비동결 지반과는 다른 물리적 거동 특성을 나타내게 된다.

Fig. 2는 동결 지반에서 얼음 알갱이의 형성 과정을 나타낸 그림이다. 공극 속의 수분은 초기에 온도가  $T_{sc}$  까지 떨어지더라도 얼지 않고 과냉각수의 형태로 준안정 평형상태를 유지하고 있다가 순간적인 얼음결정 핵의 생성으로 자유수의 동결이 시작된다. 그 과정에서 방출되는 잠열로 동결 시작 온도는 0℃에 근접한  $T_f$ 로 상승하게 되며 지반의 온도가 감소함에 따라 잠열의 방출량은 동결되는 수분의 양에 비례하여 서서히 감소하게 된다. 지반의 온도가 약 -70℃ 정도인  $T_e$ 에 도달하게 되면 대부분의 수분은 동결되고 잠열의 방출로 인한 효과도 사라지게 된다(Andersland & Ladanyi, 2004).

동결 지반에서 얼음의 형태는 흙 입자의 표면을 둘러싸기도 하고 큰 얼음 덩어리를 형성하기도 하는 등 매우 다양한 형태로 존재하게 된다. Wilbur et al.(1978)은 함빙비에 따른 얼음의 형태를 Fig. 3과 같이 정의하였다. 함빙비란 동결 지반에 포함된 얼음의 양을 나타내며 Eq. (1)과 같이 정의한다(Andersland & Ladanyi, 2004).

$$i_r = \frac{M_i}{M_w} = \frac{w - w_u}{w} \quad (1)$$

여기서  $M_i$ 는 총 얼음의 체적,  $M_w$ 는 총 물의 체적,  $w$ 는

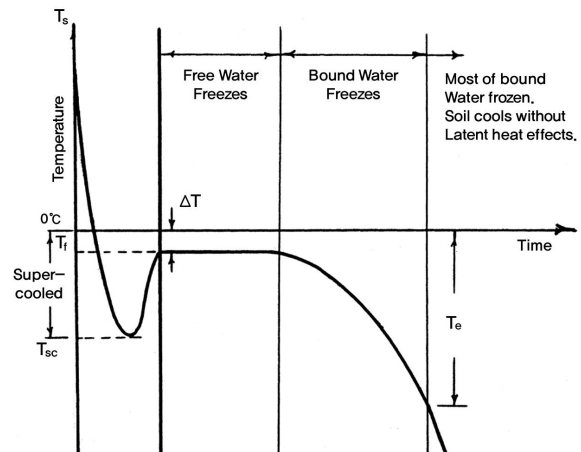


Fig. 2. Cooling curve for soil water and ice (Andersland & Ladanyi, 2004)

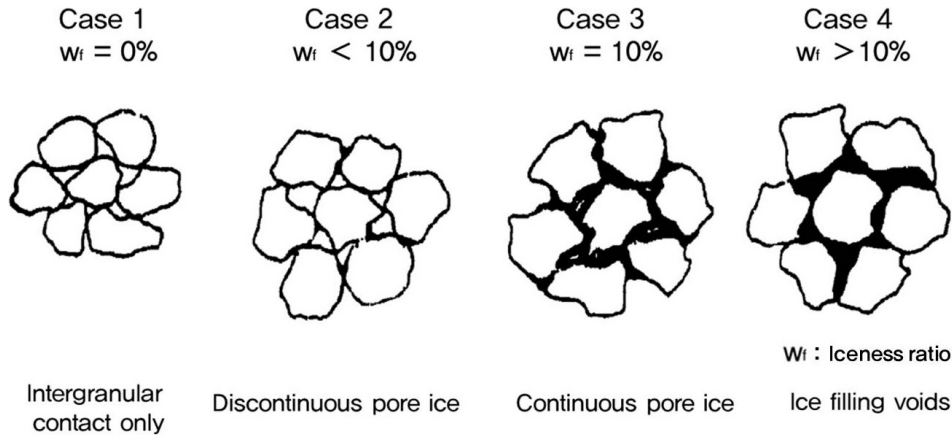


Fig. 3. Relationship between iceness ratio and the development of pore ice within the soil void spaces (Wilbur et al., 1978)

총 함수비,  $w_f$ 는 부동수분의 함수비이다. 함빙비가 0%인 경우 지반에 얼음은 존재하지 않고 입자간의 접촉면만 존재하게 된다. 함빙비가 증가함에 따라 흙 입자 표면을 따라 부분적으로 얼음 알갱이들이 생성되고 함빙비가 약 10%가 되면서 얼음은 연속적인 형태를 보이게 된다. 함빙비가 10% 이상일 경우 생성되는 얼음은 나머지 공극을 채우게 된다.

## 2.2 동결온도에서 다짐 특성

Johnson & Sallberg(1962)는 실트질 모래로 온도에 따른 다짐곡선의 경향을 파악하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다. 온도가 74°F(24°C)에서 10°F(-12°C)로 낮아짐에 따라 최대 건조단위중량 또한 낮아지는 경향을 나타내었으며, 이를 통해 온도가 0°C 이하로 낮아지게 되면 다짐 효과가 감소함을 확인할 수 있다. Wilbur et al.(1978)은 낮은 온도에서 다짐 효과를 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.

## 3. 시험 방법

본 연구에서 수행한 다짐시험은 KS F 2312(2001)의 표준 A다짐 방법을 기준으로 실시하였으며, 자세한 시험방법은 생략한다.

### 3.1 시료의 기본 물성

본 시험에서는 주문진 표준사와 카울리나이트가 사용되었다. 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해 체가름 시험(KS

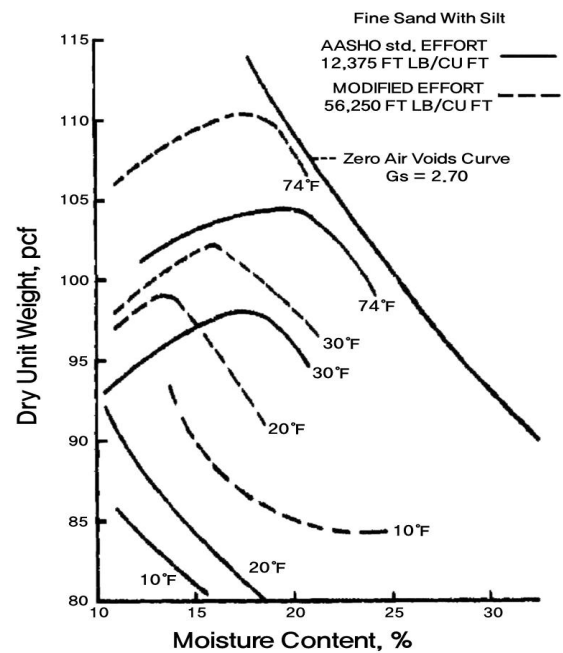


Fig. 4. Effect of freezing temperature on compaction of a silty fine sand (Johnson & Sallberg, 1962)

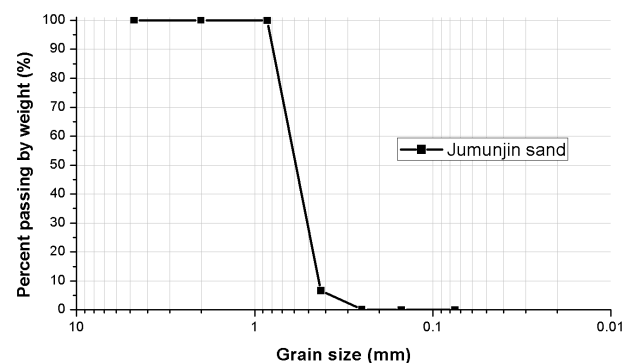


Fig. 5. Grading curve of Jumunjin sand

F 2302, 2002), 액성한계·소성한계 시험(KS F 2303, 2000), 비중시험(KS F 2308, 2006)을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 5 및 Table 1과 같다.



Fig. 6. Freezing chamber and temperature controller for test



Fig. 7. Tested water and infrared rays thermometer

### 3.2 시험 조건

영하의 온도라는 상황을 모사하기 위해 모든 시험은 온도가 일정하게 유지되는 대형 챔버 내에서 진행되었다. Fig. 6은 시험에 사용된 챔버 및 온도 컨트롤러 사진이다. 챔버는 4,300mm(W) × 5,000mm(L) × 3,700mm(H)의 크기로 외부에서 컨트롤러를 통해 온도 조절이 가능하며, ±0.1℃의 온도 분포 정밀도로 제어가 가능하다.

Fig. 7은 시험에 사용된 물과 적외선 온도계이다. 시험 조건을 현장의 조건과 비슷하게 모사하기 위해 시험에 사용되는 모든 시료 및 시험기구들은 시험 온도에서 충분히 냉각시킨 후 적외선 온도계로 온도 측정을 하고 시험을 수행하였다. 다짐 시험에 사용된 물은 냉동챔버에서 2시간 이상 동결시킨 후 사용하였다. 또한 다짐 시료를 시험 함수비로 제작한 후 냉동챔버에 약 20분간 방치하여 제작과정에서 발생된 마찰 및 압력으로 인한 교란의 영향을 최소화하였다.

## 4. 시험 결과 및 분석

Table 2는 온도 및 세립분 함량에 따른 최적함수비와 최대건조단위중량을 나타내었고, Fig. 8은 상온(18℃), -3℃, -8℃에서 세립분 함량에 따른 다짐곡선을 나타내었으며 다짐곡선은 모두 영공기 간극곡선(Zero Air Void Curve; ZAVC)의 아래에 위치함을 확인하였다.

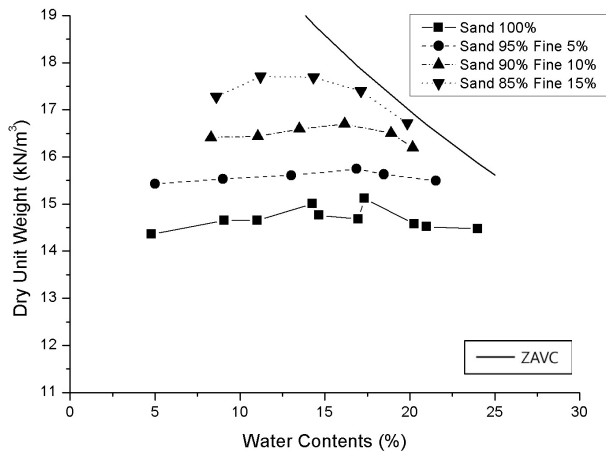
Table 2와 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 상온에서 세립분 함량이 증가할수록 다짐곡선은 좌측 상부로 이동함을 알 수 있다. 이는 일반적인 풍화토의 다짐곡선이 입도분포가 좋을수

Table 1. Summary of properties of Kaolinite and Jumunjin sand

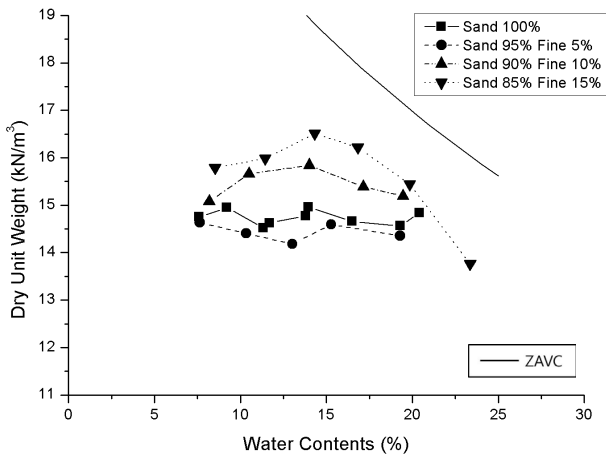
	Liquid limit L (%)	Plastic limit PL (%)	Plasticity index PI	Specific gravity Gs	Passing percentage of No. 200 Sieve (%)	USCS
Kaolinite	47.55	31.71	15.84	2.49	98.55	ML
Jumunjin Sand	-	-	-	2.61	-	SP

Table 2. Summary of compaction test results

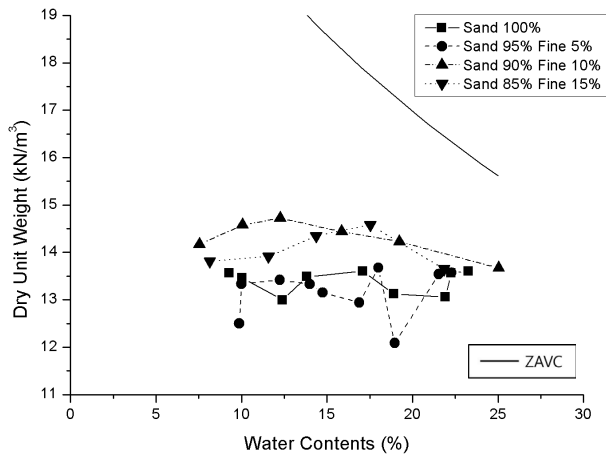
		Sand 100% Fine 0%	Sand 95% Fine 5%	Sand 90% Fine 10%	Sand 85% Fine 15%
18℃	Optimum water contents (%)	17.33	16.86	16.15	12.77
	Maximum dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	15.12	15.75	16.70	17.74
-3℃	Optimum water contents (%)	13.96	15.28	14.01	14.32
	Maximum dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	14.96	14.60	15.84	16.51
-8℃	Optimum water contents (%)	17.10	18	12.26	17.53
	Maximum dry unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	13.61	13.68	14.72	14.58



(a) Room Temperature (18°C)



(b) -3°C



(c) -8°C

Fig. 8. Compaction curves of tested soils with zero air void curve at room temperature (18°C), -3°C and -8°C

록 최대건조단위중량은 증가하고 최적함수비는 감소하는 경향과 일치한다. 세립분 함량이 0%일 경우 입도분포가 나빠기 때문에 입자간의 마찰저항과 물의 표면장력의 영향으로 최대 약 17%의 최대건조단위중량의 감소를 보였으며 세립분 함량이 증가할수록 입도분포는 양호해지며 토립자 사

Table 3. Reduction ratio of maximum dry unit weight at tested temperature

	Sand 100% Fine 0%	Sand 95% Fine 5%	Sand 90% Fine 10%	Sand 85% Fine 15%
-3°C	1.07%	7.88%	5.43%	7.45%
-8°C	9.99%	15.72%	13.45%	21.67%

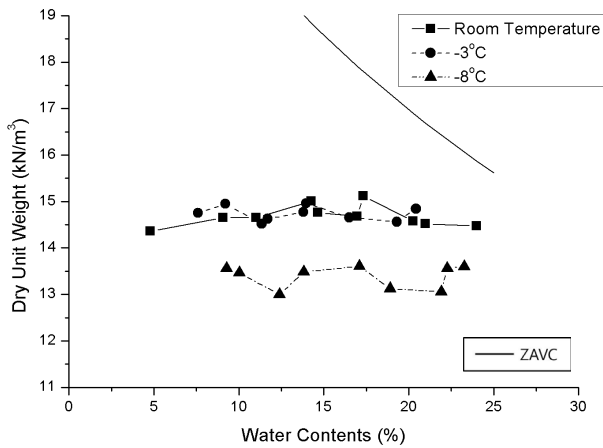
이의 간극이 세립분으로 채워지게 되어 최대건조단위중량은 증가하게 된다. 반면 영하의 온도에서는 더 많은 세립분을 함유하고 있음에도 불구하고 더 낮은 최대건조단위중량을 나타내어 세립분 함량에 따른 최대건조단위중량의 경향을 확인할 수 없었다. 이는 영하의 온도에서 생성된 매우 불균질한 얼음 알갱이들이 마치 흙 입자와 같은 역할을 하여 입도분포에 영향을 주었기 때문이라고 판단된다.

Fig. 9는 세립분 함량에 따른 온도별 다짐곡선을 나타낸 그림이다. 세립분 함량이 0%일 경우 상온과 -3°C에서의 최대 건조단위중량의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았으며, -8°C에서도 다른 시료에 비해 최대 건조단위중량의 감소율이 작은 것으로 나타났다. 반면 세립분이 함유되었을 경우 최대 건조단위중량은 온도가 낮아질수록 감소하는 것으로 나타났다. 이는 세립분이 함유되었을 경우 간극사이의 세립분이 차지해야 할 공간을 얼음 알갱이가 차지하게 되어 이러한 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 최적함수비의 경우 뚜렷한 경향을 찾을 수 없는데 이는 앞 절의 문헌연구에서 나타난 결과와 동일한 결과이다.

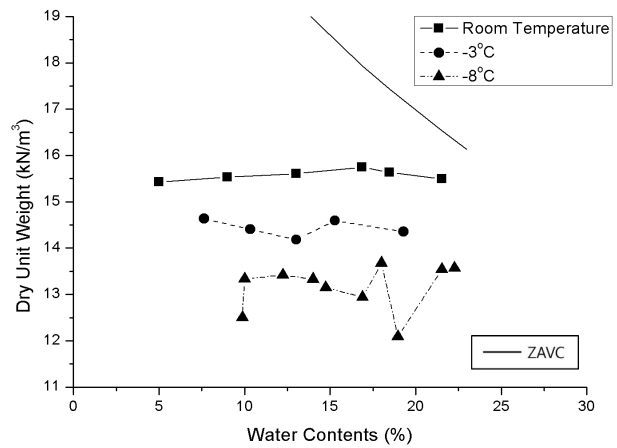
Table 3은 세립분 함유량에 따라 온도별 최대건조단위중량의 감소율을 나타낸 표이다. 현재 지방서에서는 대부분의 토질구조물의 상대 다짐도를 수정다짐기준 90~95%로 규정하고 있으며(NAVFAC, 1982) 이를 고려했을 때 -3°C에서의 토질구조물 시공은 가능하지만 -8°C의 경우 시공을 했을 때 구조물의 안정성에 문제가 있을 것으로 판단된다. 따라서 겨울철 -8°C 이하 또는 이에 준하는 온도에서는 다짐시공을 피하여야 하며 부득이하게 시공을 해야 하는 상황을 대비해 지방서의 다짐기준을 만족하는 최대건조단위중량을 획득하기 위한 동절기 다짐기법에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

## 5. 결 론

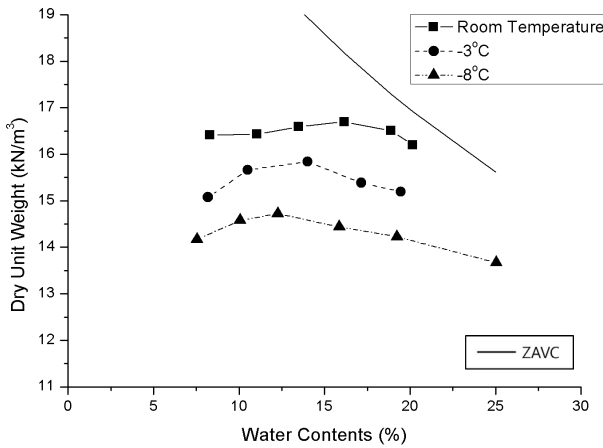
본 연구에서는 동절기 영하의 온도가 다짐성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 상온, -3°C, -8°C에서 세립분 함량을 달리하여 다짐시험을 실시하였으며 이를 통해 획득한 다짐곡선을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.



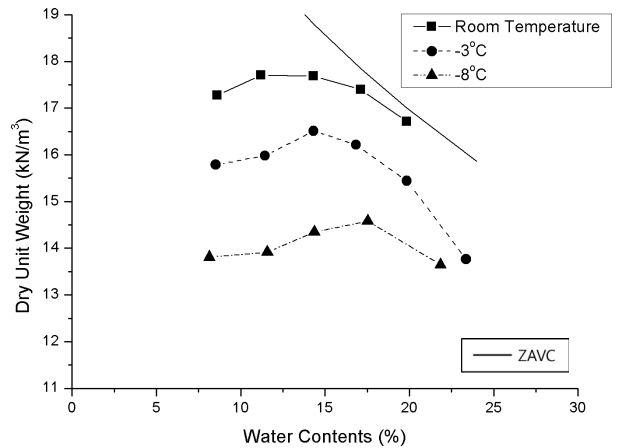
(a) Sand 100% Fine 0%



(b) Sand 95% Fine 5%



(c) Sand 90% Fine 10%



(d) Sand 85% Fine 15%

Fig. 9. Compaction curves at tested temperature with zero air void curves in several mixing ratio

- (1) 상온에서 다짐곡선은 일반적인 풍화토의 다짐특성과 마찬가지로 세립분 함량이 증가할수록 최대건조단위중량은 증가하고 최적함수비는 감소하는 결과를 나타내었다. 반면 영하의 온도에서는 세립분 함량에 따른 최대 건조단위중량의 경향을 확인할 수 없었다. 이는 영하의 온도에서 생성된 매우 불균질한 얼음 알갱이들이 마치 흙 입자와 같은 역할을 하여 입도분포에 영향을 주었기 때문이라고 판단된다.
- (2) 세립분 함량이 0%인 경우 상온과 영하의 온도에서 최대건조단위중량의 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 반면 세립분이 함유되었을 경우 최대건조단위중량은 온도가 낮아질수록 감소하는 것으로 나타났다. 최적함수비의 경우 뚜렷한 경향을 찾을 수 없었다. 이는 온도 및 세립분 함유량에 의한 부동수분의 차이에 기인한 것으로 판단되며 이와 관련된 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 현재 지방사에서 규정하고 있는 토질구조물의 상대 다짐도는 수정다짐기준 90~95%이며(NAVFAC, 1982)

이를 고려했을 때 -3°C에서의 토질구조물 시공은 가능하지만 -8°C의 경우 시공 시 구조물의 안정성에 문제가 있을 것으로 판단된다.

위 결론을 통해 동절기 다짐 시 얼음 알갱이에 대한 최대 건조단위중량 및 최적함수비의 영향을 파악하기 위해 부동수분을 측정하여 함량비에 따른 다짐곡선의 경향을 파악할 필요가 있다고 판단된다. 또한 겨울철 -8°C 이하 또는 이에 준하는 온도에서 지방서의 다짐기준을 만족하는 다짐시공을 위해서는 실험실 수준에서의 연구뿐만 아니라 현장 적용성을 평가하기 위한 시험 시공 및 현장 시험이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(극한지 기반평가 및 극한환경 모니터링시스템 개발)과 국토교통기술촉진

연구사업(해빙기 안정성 확보를 위한 동절기 다짐기법 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

1. 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.
2. Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (2004), Frozen ground engineering second edition, John Wiley & Sons, Inc., Canada, pp. 24~25.
3. Choi, D. W. (1997), Hot weather and cold weather concreting, Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 9, No. 4, pp. 14~23 (in Korean).
4. Ha, S. W. (2011), Engineering characteristics of weathering soil in Kwanggyo and Hwasung, Master's thesis, Korea University, pp. 22~30 (in Korean).
5. Johnson, A. W. and Sallberg, J. R. (1962), Factors influencing compaction test results, Highway Research Board Bulletin, U.S., Vol. 319, pp. 148.
6. Kim, Y. W. (1998), Cold weather concreting and quality control of Incheon International Airport, Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 10, No. 2, pp. 71~78 (in Korean).
7. KS F 2302 (2002), Test method for particle size distribution of soils, pp. 1~10 (in Korean).
8. KS F 2303 (2000), Test method for liquid limit and plastic limit of soils, pp. 1~4 (in Korean).
9. KS F 2308 (2006), Test method for density of soil particles, pp. 1~4 (in Korean).
10. KS F 2312 (2001), Test method for soil compaction using a rammer, pp. 1~6 (in Korean).
11. Kweon, G. C., Hwang, T. J., Lee, J. H. and Lee, C. J. (2010), Deformational characteristics of subgrade soils with freeze-thaw, Journal of the Korean Society of Road Engineers, Vol. 2010, No. 9, pp. 15~20 (in Korean).
12. Lee, D. B., Kim, H. R., Lee, J. W., Park, J. H. and Choi, I. H. (2006), A curing method of cold weather concreting using of heating cable in winter construction, Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 18, No. 6, pp. 46~50 (in Korean).
13. NAVFAC (1982), Foundations and earth retaining structures design manual, DM 7.2, Department of the Navy, Alexandria, Va., pp. 45~53.
14. Park J. S. (1981), A study on the compaction and permeability of soil, Theses of Taejon Technical Junior College, Vol. 29, pp. 247~254 (in Korean).
15. Paul, M. A. (1980), The compaction of soil: a geological and geotechnical analysis, Soils Discussion Group, North of England, Vol.16, pp. 63~82.
16. Shin, E. C., Ryu, B. H. and Park, J. J. (2009), Geotechnical characteristics of frost-susceptibility soil using modified freeze-thaw apparatus, Korean Geosynthetics Society, Vol. 8, No. 1, pp. 53~59 (in Korean).
17. Swan, C. W., Grant, A. and Kody, A. (2013), Characteristics of chicago blue clay subjected to a freeze-thaw cycle, ASTM Social Technical Publication, New York, Vol. 1568, pp. 22~32.
18. Taylor, J. H. and Gill, W. R. (1984), Soil compaction: state-of-the-art report, Journal of Terramechanics, Vol. 21, No. 2, pp. 195~213.
19. 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.
20. Wilbur M., Haas Bernard D., Alkire Thomas 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.