

영하에서의 다짐에너지에 따른 다짐 효과 평가

Evaluations on the Compaction Energy Effects on the Soil Compaction at Sub-Zero Temperature

이 정 협¹⁾ · 황 범 식¹⁾ · 채 덕 호¹⁾ · 조 완 제[†]

Jeonghyeop Lee · Bumsik Hwang · Deokho Chae · Wanjei Cho

Received: April 30th, 2015; Revised: May 12th, 2015; Accepted: June 22nd, 2015

ABSTRACT : Due to the population growth and exhaustion of resource, the development on the harsh environment such as cold weather is emerging as an alternative for new resource development. The permafrost area covers about 14 percent of the world's land area and the global construction market for such area is rapidly expanded. Whereas the developed countries have already recognition of the need for research of coldest place and invested heavily in technology development, the domestic technology for the coldest place development is less developed and related research has rarely been performed. There is not a detailed national specification standard for the strength and deformation properties of the earthworks at sub-zero temperature but simple field directions. Therefore, the D compaction tests were conducted on the sand with fine contents of 0%, 5%, 10% and 15% at room temperature (18°C), -3°C and -8°C to investigate the effect of the compaction energy on the compacted soils at sub-zero temperatures. Based on the test results, the larger compaction energy, the larger maximum dry unit weight under sub-zero temperature and D type compaction at -3°C show similar max. dry unit weights as those obtained from the compaction at the room temperature. However, compaction at -8°C showed significant performance degradation regardless of the compaction energy.

Keywords : Sub-zero temperature, Soil compaction, Compaction energy, Maximum dry unit weight

요 지 : 인구가 증가하고 자원이 고갈되면서 새로운 자원개발을 위한 대안으로 극한지 개발이 떠오르고 있다. 전 세계 육지 면적 중 14%가 극한지 지역에 해당되며, 이 지역들의 개발을 위한 해외극지 건설시장이 많이 확대되었다. 이미 선진국들은 극한지 연구의 필요성을 인식하고 기술 개발에 많은 투자를 하고 있는 반면, 우리나라의 경우 극한지 개발을 위한 기술이 선진국에 비해 매우 낮으며 관련 연구 또한 미약한 실정이다. 국내의 동절기 시공의 경우 지반동결에 의한 강도 및 변형특성에 대한 명확한 기준이 마련되어있지 않으며 현장에서의 간단한 지침을 통해서만 관리되고 있다. 따라서 본 연구에서는 상온(18°C), -3°C, -8°C에서 세립분 함량을 0%, 5%, 10%, 15%로 변화하면서 D 다짐 시험을 실시하여 영하온도에서의 다짐특성에 대해 살펴보았으며, 기존의 문헌연구와 비교를 통해 영하온도에서의 다짐에너지에 따른 다짐 효과에 대해 평가하였다. 시험 결과 영하온도에서 다짐에너지가 클수록 최대건조단위중량은 증가하는 것으로 나타났으며, -3°C에서의 D다짐 시험결과와 상온의 결과와 크게 다르지 않으나 -8°C 이하에서의 다짐시공 시 다짐성능의 저하가 상당한 것으로 나타났다.

주요어 : 영하온도, 다짐, 다짐에너지, 최대건조단위중량

1. 서 론

인구가 증가하고 자원이 고갈되면서 새로운 자원개발을 위한 세계 각국의 경쟁이 날로 치열해지고 있다. 이러한 분위기 속에 극한지 개발이 새로운 대안으로 떠오르고 있으며, 그중에서도 지구에 남은 마지막 자원의 보고로 꼽히는 남극과 북극에 대한 중요성이 대두되고 있다. 이미 선진국들은 가치창출을 위한 극한지 연구의 필요성을 인식하고, 향후 극한지 개발의 주도권을 잡기 위해 많은 투자를 하고 있다. 이에 발맞춰 우리나라도 장보고 과학기지를 세우고 북

극 이사회의 정식옵서버 자격을 보유하는 등 국제정세에 뒤처지지 않기 위해 노력하고 있지만, 극한지 개발을 위한 기술수준이 선진국에 비해 미약한 실정이다.

극한지라고 하면 한지, 사막, 심해저 등 매우 추운 곳을 말하며 일반적으로 -30°C 이하인 지역을 말한다. 지구상에서 극한지 지역은 남극, 북극을 포함해 시베리아, 알래스카 등 전 세계 육지의 약 14% 정도이며 이 지역들의 개발을 위한 해외극지 건설시장이 많이 확대된 상태이다. 따라서 국내 기업들의 해외극지 건설시장 진출을 위해 동토지역에서의 구조물 시공 시 발생할 수 있는 공학적 문제들을 해결

1) Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

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

하기 위한 동토지반의 공학적 특성을 고려한 구조물의 설계 및 시공의 체계적이고 전문적인 연구가 필요하다.

국내의 경우 동결기 시공에 대한 명확한 기준이 마련되어 있지 않으며, 현장에서의 간단한 지침을 통해서만 관리되고 있다. 토공에서 상당한 부분을 차지하는 다짐의 경우 70~80년대에 많은 연구들이 이루어졌다(Park, 1981; Paul, 1980; Taylor & Gill, 1984). 온도의 영향을 고려한 다짐특성에 대한 연구에 따르면 온도가 낮아질수록 최대진조단위중량이 감소하는 것으로 나타났으며(Ctori, 1989; Johnson & Sallberg, 1962), 상대다짐도 또한 온도가 낮아질수록 감소하는 것으로 알려져 있다(Heiner, 1972).

동결지반의 다짐특성에 대한 선행연구인 Hwang et al. (2015)의 표준 A다짐결과를 통해 동결토의 다짐특성의 경향을 확인할 수 있었지만, 현장에서의 다짐관리를 위한 정확한 정보를 위해서 실제 현장조건에 근접한 수정 D다짐을 실시한 필요가 있다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 Hwang et al.(2015)의 다짐조건과 동일한 세립분 함량 0, 5, 10, 15%에 대해 상온(18°C), -3°C, -8°C에서 수정 D다짐을 실시하여 Hwang et al.(2015)의 표준 A다짐결과와 비교하고, 이를 통해 영하온도에서 다짐에너지에 따른 최적함수비와 최대진조단위중량의 경향을 파악하여 동결지반에서 시공 시 보다 효율적인 현장 다짐관리를 위한 정보를 제공하고자 한다.

2. 동결온도에서의 다짐

2.1 동결온도에서 흙의 특성

흙은 일반적으로 토립자, 물, 공기의 3상 구조를 가지는 것으로 알려져 있다. 하지만 지반이 동결되면 간극 속의 물이 얼음으로 응결되면서 흙은 토립자, 물, 공기, 얼음의 4상 구조를 나타내게 된다. Fig. 1은 Ting(1981)에 의해 제안된 동결지반의 4상 구조를 개념적으로 나타낸 그림이다.

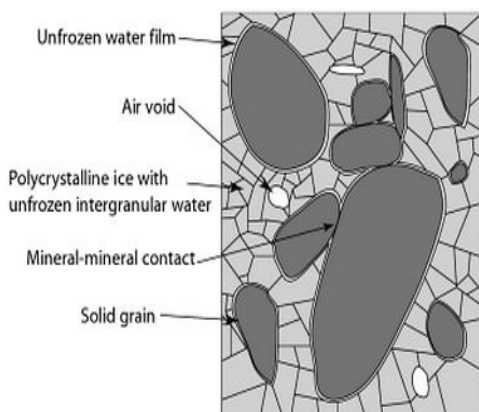


Fig. 1. Two dimensional schematic of the frozen sand (Ting, 1981)

낮은 온도에 의해 지반이 동결하여도 일정한 온도까지 얼지 않고 남아있는 수분을 부동수분이라고 한다. 부동수분의 양은 흙의 비표면적 및 입자의 배열상태, 온도 등에 따라서 달라지는 것으로 알려져 있으며(Hivon & Sego, 1995), 부동수분이 많고 적음에 따라 동결토를 구성하는 얼음의 형태는 작은 얼음알갱이로 존재하거나 토립자의 표면을 연결시켜 큰 얼음 덩어리를 형성하기도 한다. 토립자와 얼음 사이의 밀착관계가 변화함에 따라 동결토의 물리적 거동 특성이 달라지므로 부동수분을 측정하는 것은 매우 중요하다.

Andersland & Ladanyi(2004)는 동결지반에서 생성되는 얼음의 양을 함빙비로 정의하였으며 Eq. (1)과 같이 나타내었다.

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

여기서 M_i 는 얼음의 총 중량, M_w 는 물의 총 중량, w_u 는 부동수분의 함수비를 말한다.

지반이 동결되면 간극사이의 수분이 작은 얼음알갱이의 형태로 생성된다. 하지만 함수비가 10%를 넘어서면 토립자의 표면을 따라 생성되는 얼음들이 연결되기 시작하며, 함수비가 높아질수록 간극이 얼음으로 채워지면서 토립자들이 하나의 큰 덩어리의 형태로 성장한다(Hass et al., 1978).

2.2 동결온도에서 다짐특성

Johnson & Sallberg(1962)는 실트질 모래의 온도변화에 따른 다짐곡선의 경향을 Fig. 2를 통해 나타냈다. 온도가 낮아

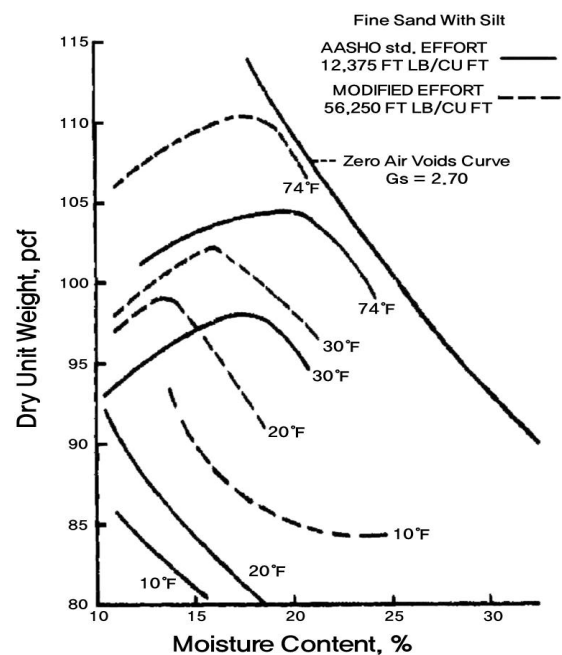


Fig. 2. Effect of freezing temperature on compaction of a silty fine sand (Johnson & Sallberg, 1962)

질수록 최대건조단위중량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 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 다짐 효과가 감소하는 것을 알 수 있었으며, 감소 효과는 온도가 낮거나 함수비가 높을수록 더 크게 나타났다.

3. 시험 재료 및 방법

본 연구에서 수행한 다짐시험은 KS F 2312(2001)의 수정 D다짐방법을 기준으로 실시하였으며, 자세한 시험방법은 생략한다. 비교를 위한 표준 A다짐의 결과는 Hwang et al. (2015)에 의해 실시된 표준 A다짐의 결과를 사용하였다.

3.1 시료의 기본 물성

본 시험에서는 시료를 세립분 함량별로 구분하기 위해 주문진표준사와 카올리나이트를 사용하였다. 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해 주문진표준사와 카올리나이트의 물

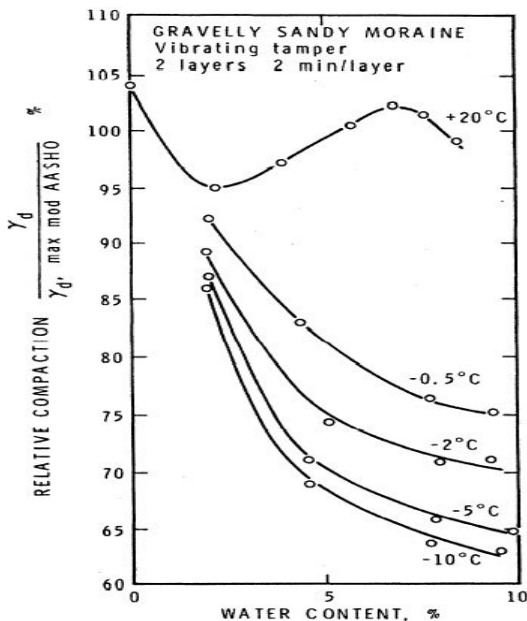


Fig. 3. Compaction curves for a granular material placed at freezing temperature (Heiner, 1972)

Table 1. Summary of properties of Jumunjin sand and Kaolinite

| | 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 |

성시험을 실시하였다. 시험은 체가름 시험(KS F 2302, 2002), 액성한계 & 소성한계 시험(KS F 2303, 2000), 비중시험(KS F 2308, 2006)을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 Table 1과 같다.

3.2 영하온도에서의 시료 조성

본 시험에서는 영하온도환경을 조성하기 위해 온도제어가 가능한 대형 냉동챔버(4,300mm×5,000mm×3,700mm) 내에서 모든 시험을 진행하였다. 온도는 외부 컨트롤러를 통해 -50°C~50°C의 온도 범위를 0.1°C 단위로 제어가 가능하다.

본 시험에서 수행할 수정 D다짐시험의 결과와 Hwang et al.(2015)에 의해 실시된 표준 A다짐의 비교를 위해 시료 제작방법과 다짐시험을 수행할 영하온도는 Hwang et al.(2015)에서 제시된 것과 일치시켰다. 따라서 다짐시험은 상온 18°C와 영하온도 -3°C와 -8°C에서 실시하였으며, 다지기 전 시료 또한 시험 온도에서 약 20분간 방치한 후 시험을 진행하였다. 시료 제작과정에서 발생할 수 있는 교란의 영향을 최소화하기 위해 다짐시험에 사용된 물은 최소 2시간 이상 동결시킨 후 사용하였으며, 시험기구들은 시험 온도에서 충분히 냉각시킨 후 시험을 진행하였다.

3.3 함빙비 측정

본 시험에서는 함빙비와 다짐곡선의 관계에 대해 알아보기 위해 TDR 장비를 이용하여 부동수분을 측정하였다. Fig.

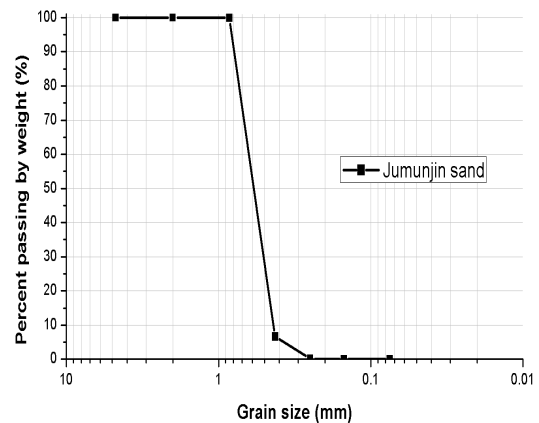


Fig. 4. Grain size distribution of Jumunjin sand

5는 시험에 사용된 TDR 장비와 TDR 장비를 이용해 부동수분 측정용을 하고 있는 그림이다. 측정은 영하온도(-3℃, -8℃)에서 실시하였으며, TDR 장비는 정확도가 약 ±3%이고 0~100% 범위의 수분함유량을 측정하는 것이 가능한 프로브를 사용하였다. 밀도차이에 의해 발생할 수 있는 체적 당 함수비에 대한 오차에 대해서는 결과에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단하여 보정을 실시하지 않았다. 함빙비는 다짐시험을 실시한 시료에 프로브를 꽂아 체적함수비를 측정하였고 이를 중량함수비로 치환하여 초기함수비와의 비교를 통해 산정하였다.

4. 시험 결과

4.1 다짐에너지에 따른 다짐특성 변화

Table 2는 본 연구에서 수행한 수정 D다짐과 Hwang et al.(2015)에 의해 수행된 표준 A다짐의 시험결과를 세립분 함

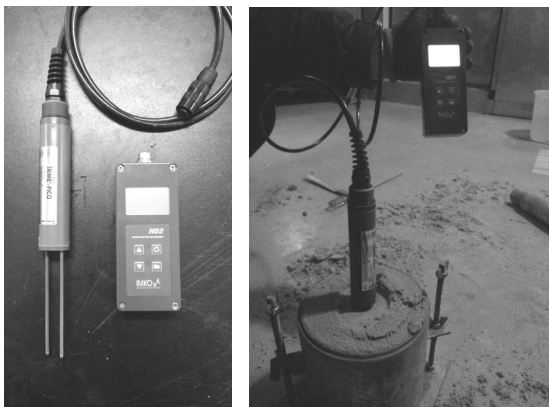


Fig. 5. TDR probe (left) and measurement of unfrozen water contents (right)

량에 따른 최대건조단위중량과 최적함수비로 나타낸 표이며, Fig. 6은 표준 A다짐과 수정 D다짐의 세립분 함량에 따른 다짐곡선을 온도(18℃, -3℃, -8℃)별로 나타낸 그림이다.

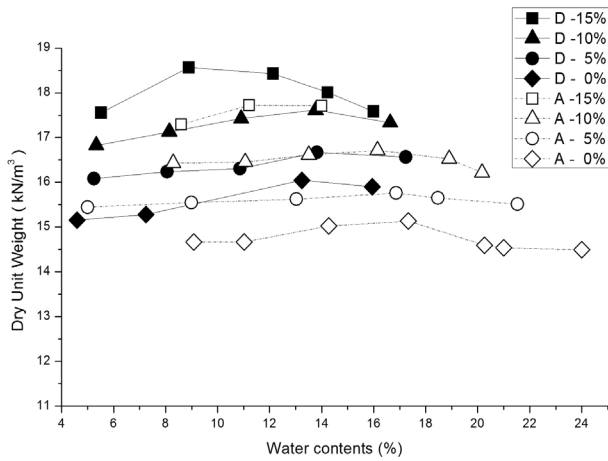
일반적으로 다짐에너지가 클수록 최대건조단위중량이 증가하고 최적함수비가 감소하여 다짐곡선이 좌측상부로 이동하는 것으로 알려져 있다. Fig. 7은 Fig. 6의 다짐곡선에서 다짐에너지 변화에 따른 최대건조단위중량과 최적함수비의 변화를 온도(18℃, -3℃, -8℃)별로 나타낸 그림이다. Table 2와 Fig. 6, Fig. 7을 통해 본 시험을 실시한 각각의 온도(18℃, -3℃, -8℃)에서 다짐에너지를 표준 A다짐에서 수정 D다짐으로 약 5배 증가시킨 결과, 다짐에너지가 증가함에 따라 최대건조단위중량이 증가하고 최적함수비가 감소하여 다짐곡선이 좌측상부로 이동하는 경향을 볼 수 있었으나 각각의 다짐곡선들이 이동한 정도는 일정하지 않았다. 이는 영하온도에서의 다짐에너지에 따른 다짐 효과가 일반적인 경향과 일치하지만 생성된 얼음알갱이의 형상과 크기에 따라 다짐 에너지에 따른 다짐 효과가 불균일하게 나타난 것으로 판단된다.

4.2 세립분 함량에 따른 다짐특성 변화

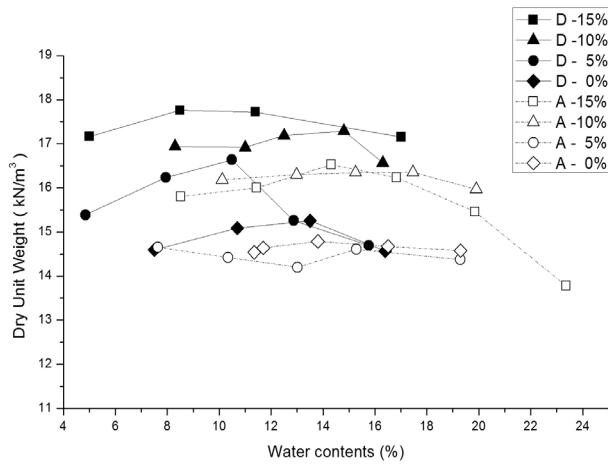
Fig. 8은 수정 D다짐의 세립분 함량의 변화에 따른 최대건조단위중량과 최적함수비의 변화를 나타낸 그림이다. 조립토의 경우 입도분포가 좋을수록 최대건조단위중량은 증가하고 최적함수비는 감소하는 것으로 알려져 있다. Table 2와 Fig. 8(a)를 통해 -8℃의 세립분 함량 15%인 경우를 제외한 모든 케이스에서 세립분 함량이 증가할수록 최대건조단위중량이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 토립자 사이의 간극이 세립분으로 채워지게 되면서 입도분포가 좋아지는 효과를 얻은 것이라 판단된다. 반면 최적함수비의

Table 2. Summary of compaction test result

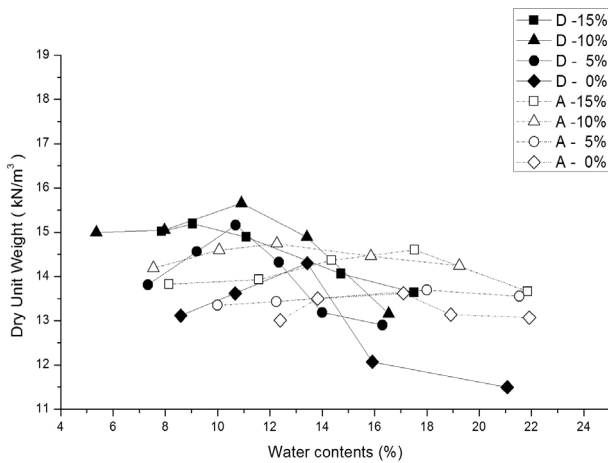
| Type | Temperature | Contents | Sand 100% Fine 0% | Sand 95% Fine 5% | Sand 90% Fine 10% | Sand 85% Fine 15% |
|-----------|-------------|--|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| A type | 18℃ | Optimum moisture contents (%) | 17.33 | 16.86 | 16.15 | 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 |



(a) 18°C



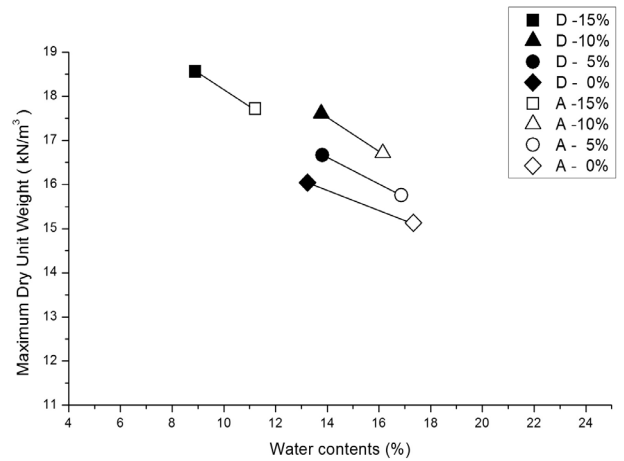
(b) -3°C



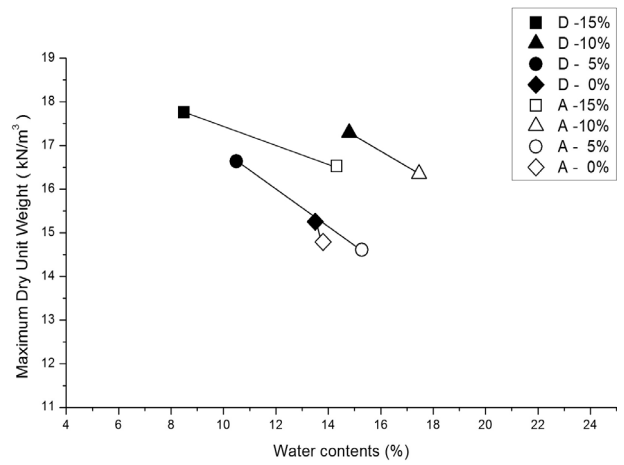
(c) -8°C

Fig. 6. Compaction curves of A-type and D-type at 18°C, -3°C and -8°C

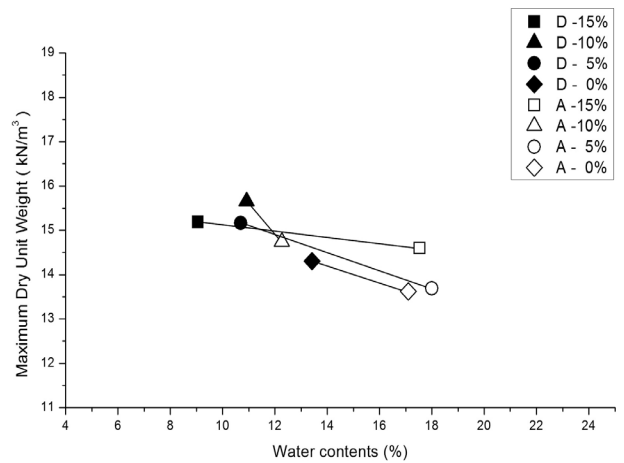
경우 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다. 이는 영하의 온도에서 생성된 얼음 알갱이가 입도분포에 영향을 미친 것으로 판단되며, -8°C의 세립분 함량 15%의 최대건조단위중량이 감소한 것 역시 같은 이유에 의한 영향으로 판단된다.



(a) 18°C



(b) -3°C

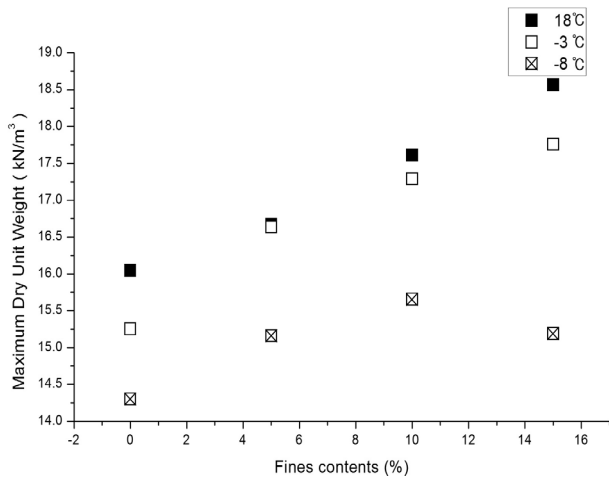


(c) -8°C

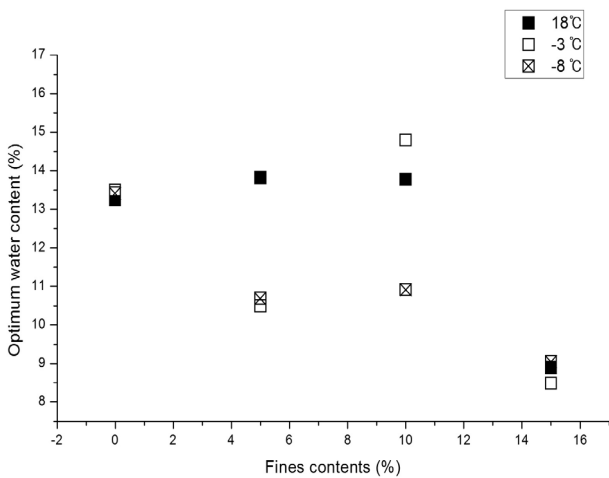
Fig. 7. Variation of maximum dry unit weight with optimum water contents at 18°C, -3°C and -8°C

4.3 영하의 온도에 의한 다짐특성 변화

Table 3은 수정 D다짐에 의한 세립분 함량에 따른 함빙비의 평균을 온도(-3°C, -8°C)별로 나타낸 표이며, Fig. 9는 수정 D다짐에 의한 세립분 함량에 따른 다짐곡선을 온도



(a) Maximum dry unit weight

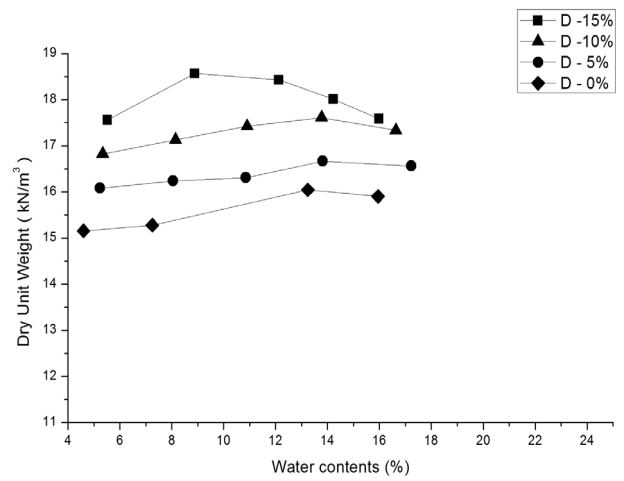


(b) Optimum water contents

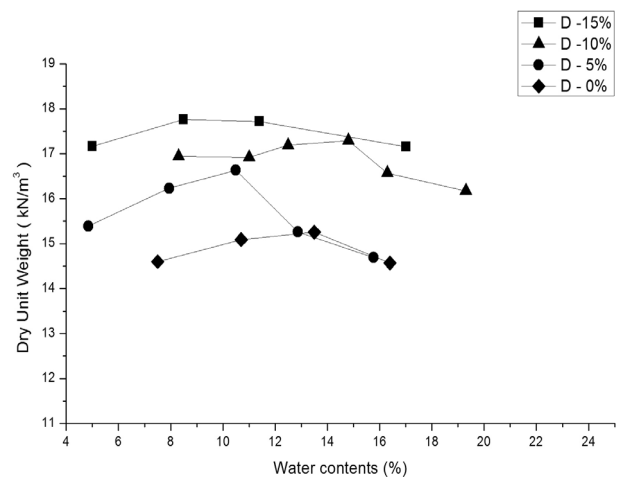
Fig. 8. Maximum dry unit weight (a) and Optimum water contents (b) with regard to various fine contents

(18°C, -3°C, -8°C)별로 나타낸 그림이다.

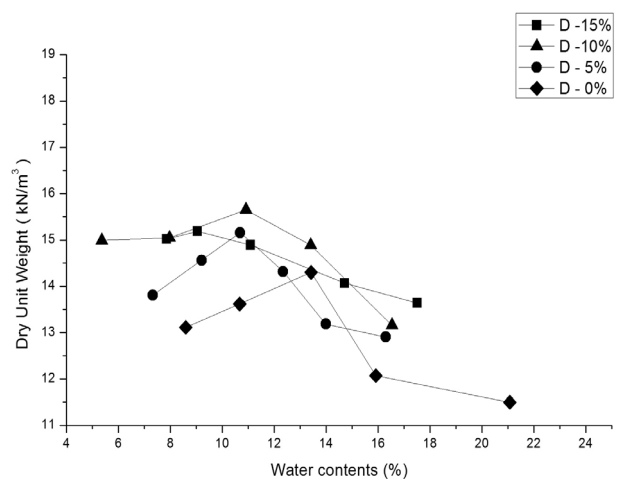
온도가 낮아질수록 최대건조단위중량이 감소하는 것을 확인할 수 있었으나, 최적함수비의 경우 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다. 온도가 영하로 떨어지게 되면 토립자 사이의 물이 동결되면서 부피가 팽창하고, 생성된 얼음 알갱이들이 간극에 채워져 시료의 밀도를 저하시키기 때문에 최대 건조단위중량이 감소하는 것으로 판단된다. 물이 동결되면 얼음 알갱이를 생성하는 것 외에도 토립자들을 연결시켜 하나의 큰 덩어리를 형성하기도 하는데, 일정한 시간에서 생성되는 얼음 알갱이와 토립자 덩어리의 형상과 크기를 예측하기 힘들 뿐만 아니라 생성량 또한 일정하지 않으므로 영하 온도에 의한 최적함수비의 경향을 확인하기 위해서는 이에 대한 추가적인 시험이 필요할 것으로 판단된다. 또한 세립분이 많을수록 부동수분도 증가한다는 일반적인 경향과는 다르게 세립분 함량의 증가에도 불구하고 함빙비의 경향을 찾을 수가 없었다. 이는 시료가 동결온도에 노출된 시간에



(a) 18°C



(b) -3°C



(c) -8°C

Fig. 9. Compaction curves of D-type at 18°C, -3°C and -8°C

Table 3. Summary of average iceness ratio

| | 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 |

따라 얼음으로 바뀌는 물의 양이 일정하지 않기 때문이라고 판단된다. Table 3과 Fig. 9의 결과를 비교해 보았을 때 -3°C에서 세립분 함량 10%의 경우 다른 시험들에 비해 함빙비의 평균이 낮게 나왔으며 다짐곡선이 우측상부로 이동한 모습을 볼 수 있었고, -8°C에서 세립분 함량 85%의 경우 다른 시험들에 비해 함빙비의 평균이 높게 나왔으며 다짐곡선이 좌측하부로 이동한 모습을 볼 수 있었다. 이를 통해 함빙비가 영하온도에서의 다짐특성에 미치는 효과가 큰 것으로 보이며, 추후 세립분 함량과 시간에 따른 함빙비의 변화에 대한 시험을 통해 함빙비와 다짐곡선의 관계에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서 수행된 다짐시험의 결과를 통해 영하의 온도에서 다짐성능이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 최대 건조단위중량의 감소율을 비교해보면 -3°C의 경우 표준 A다짐에서는 약 4.3%, 수정 D다짐에서는 약 2.8%로 5% 미만의 감소를 보였으며, -8°C의 경우 표준 A다짐에서는 약 12.8%, 수정 D다짐에서는 약 12.3%로 10% 이상의 감소를 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 영하에서의 다짐에너지에 따른 다짐 효과에 대해 파악하기 위해 수정 D다짐을 실시하였으며, 표준 A다짐과의 비교를 위해 시험조건을 Hwang et al.(2015)이 시험한 온도(18°C, -3°C, -8°C)에서 세립분 함량을 동일하게 변화하면서 다짐시험을 진행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 표준 A다짐과 수정 D다짐을 실시하여 다짐에너지를 약 5배 증가시킨 결과, 세립분 함량과 온도에 관계없이 상온에서 나타나는 다짐특성인 최대건조단위중량은 증가하고 최적함수비가 감소하는 경향을 확인하였으나, 그 경향의 정도는 영하온도에 따라 불균일하게 나타났다.
- (2) 다짐에너지와 온도에 관계없이 세립분 함량이 증가할수록 최대건조단위중량이 증가하는 것을 확인하였다. 반면 최적함수비의 경우 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었다. 이는 입도분포가 좋을수록 최대건조단위중량이 증가하고 최적함수비가 감소한다는 일반적인 경향을 미루어 보아 세립분 함량에 의한 영향이 아니라 영하의 온도에서 생성된 얼음 알갱이가 입도분포에 영향을 주었기 때문이라고 판단된다.
- (3) 다짐에너지와 세립분 함량에 관계없이 영하의 조건에서 온도가 낮아질수록 최대건조단위중량이 낮아지는 것을 확인하였으며, 이는 영하온도에서 생성된 얼음 알갱

이들에 의해 흙 시료의 밀도가 낮아졌기 때문이라 판단된다. 반면 최적함수비의 경우 뚜렷한 경향을 발견할 수 없었는데 이는 영하온도에서 생성되는 얼음 알갱이와 토립자 덩어리의 형상, 크기, 생성량에 기인한 것으로 판단되며 이와 관련된 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

- (4) 수정 D다짐을 통해 영하온도에서 다짐을 실시한 결과를 상온에서의 다짐 결과와 비교하면 최대건조단위중량이 -3°C에서는 약 2.8%, -8°C에서는 약 12.3%의 감소를 보였다.

위 결론을 통해 영하온도에서 최적함수비의 경향을 파악하기 위해 함빙비에 따른 다짐성능과 관련된 체계적인 연구를 수행할 필요가 있을 것이다. 또한 일반 토목구조물의 현장 다짐도 기준이 90~95%인 것에 미루어 볼 때 -8°C에서의 다짐은 피하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, -8°C 이하의 온도에서 다짐시공을 실시하고자 한다면 안정성 확보를 위한 다짐성능향상에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 연구비 지원(NRF-2014R1A1A1002401)과 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진 연구사업, “해빙기 안정성 확보를 위한 동절기 다짐기법 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (2004), Frozen ground engineering second edition, John Wiley & Sons, Inc., Canada, pp. 24~25.
2. Ctari, P. (1989), The effects of temperature on the physical properties of cohesive soil, Ground engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 26~27.
3. Haas, W. M., Alkire, B. D. and Kaderabek, T. J. (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.
4. Heiner, A. (1972), Strength and compaction properties of frozen soil, National swedish institute for building research, Sweden, Doc. 11, pp. 71.
5. Hivon, E. G. and Sego, D. C. (1995), Strength of frozen saline soils, Canadian Geotech Journal, Vol. 32, No. 2, pp. 336~354.
6. Hwang, B. S., Chae, D. H., Kim, Y. S. and Cho, W. J. (2015), An experimental study on the effectiveness of soil compaction, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 16, No.

- 1, pp. 37~43(in Korean).
7. Johnson, A. W. and Sallberg, J. R. (1962), Factors influencing compaction test results, Highway Research Board Bulletin, U.S., Vol. 319, pp. 148.
 8. KS F 2302 (2002), Test method for particle size distribution of soils, pp. 1~10 (in Korean).
 9. KS F 2303 (2000), Test method for liquid limit and plastic limit of soils, pp. 1~4 (in Korean).
 10. KS F 2308 (2006), Test method for density of soil particles, pp. 1~4 (in Korean).
 11. KS F 2312 (2001), Test method for soil compaction using a rammer, pp. 1~6 (in Korean).
 12. 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).
 13. Paul, M. A. (1980), The compaction of soil: a geological and geotechnical analysis, Soils Discussion Group, North of England, Vol. 16, pp. 63~82.
 14. 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.
 15. 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.