

Micro X-ray CT 촬영을 통한 동결 사질토 시료의 세립분 함유량에 따른 입자간 거리 분석

Particle Spacing Analysis of Frozen Sand Specimens with Various Fine Contents by Micro X-ray Computed Tomography Scanning

채 덕 호¹⁾ · 이 장 근²⁾ · 김 광 염²⁾ · 조 완 제[†]

Deokho Chae · Janguen Lee · Kwang-Yeom Kim · Wanjei Cho

Received: October 21st, 2016; Revised: October 27th, 2016; Accepted: November 24th, 2016

ABSTRACT : The mechanical characteristics of frozen sand greatly depend on the frozen temperature and the fine contents according to the previous study by Chae et al. (2015). There are two hypotheses to explain this experimental results; one is the unfrozen water contents greatly affected by the fine contents and frozen temperature and the other is the sand particle spacing greatly affected by the pore-ice. To evaluate the latter hypothesis, the micro X-ray CT scan was performed. The micro X-ray CT scanning, one of the actively performed interdisciplinary research area, has a high resolution with micrometer unit allows to investigate internal structure of soils. In this study, X-ray CT technique was applied to investigate the effect of the frozen temperature and fine contents on the sand particle minimum and average spacing with the developed image processing techniques. Based on the spacing analysis, the frozen temperature and fine contents have little influence on the sand particle spacing in the frozen sand specimens.

Keywords : X-ray CT, Frozen sand, Particle spacing, Fine contents

요 지 : Chae et al.(2015)에 따르면 동결 사질토의 역학적 거동은 동결온도와 세립분 함유량에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 이러한 원인으로 동결온도에 따른 부동수분의 차이일 것이라는 의견과 세립분 함유량 및 간극 내 얼음에 의해 사질토 입자들 이격거리 차이에 의한 것이라는 의견이 제시되었다. 제시된 두 가지 의견 중 사질토 입자들 이격거리의 확인을 위해 micro X-ray CT 촬영을 수행하였다. X-ray CT 촬영에 의한 비파괴 검사는 최근 지반공학 분야에서 진행되고 있는 다양한 융복합 연구 중 하나로 CT 촬영을 통하여 지반재료의 내부 구조를 마이크로미터 단위의 높은 해상도를 통해 평가할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 -5, -10, -15°C의 동결온도에서 성형된 5, 10, 15%의 세립분을 포함하고 있는 동결 사질토 공시체에 대하여 micro X-ray CT 촬영을 수행하고 기존의 개발된 이미지 해석 기법을 적용하여 동결 사질토 내의 조립질 입자들의 최단거리 및 평균거리를 통하여 세립분 함유량 및 동결온도가 조립질 입자간의 거리에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. X-ray CT 촬영 결과, 동결온도 및 세립분 함유량은 동결 사질토 내 입자간 거리에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

주요어 : X-ray CT, 동결 사질토, 입자간 이격거리, 세립분 함유량

1. 서 론

최근 우리나라는 장보고 기지 건설 및 러시아 극동지역의 천연파이프 라인 건설계약 체결을 통하여 극지 개발에 대한 다양한 노력을 기울이고 있다. 동토지반에서의 건설활동은 기상 및 기후조건, 지반의 역학적 특성이 비동결 상태의 지반과는 달라 이를 규명하고자 하는 연구도 다양하게 진행되고 있다(Andersonland & Ladanyi, 2004; Anderson & Morgenstern, 1973; Bourbonnais & Ladanyi, 1985; Bragg & Andersland, 1982; Freitag & McFadden, 1997; Haynes

& Karalius, 1977; Hivon & Sego, 1995; Wolfe & Thieme, 1964). 이러한 연구 동향에 따라 국내에서도 Chae et al.(2015)에 의해 세립분 함유량에 따른 강도 특성을 규명하는 연구가 진행된 바 있으며 세립분 함유량을 달리 제작한 공시체에 대하여 일축압축시험을 수행하여 세립분 함유량이 동결 사질토의 강도 및 강성에 미치는 영향을 파악하였다.

그 결과 일정한 동결 온도 하에서 세립분이 증가할수록 최대 일축압축강도는 감소하는 경향을 보였으며 온도가 감소할수록 최대 일축압축강도는 증가하는 경향을 보였다. 강성 또한 동일한 동결 온도 하에서 세립분 함유량이 증가할

1) Korea Railroad Research Institute

2) Korea Institute of Construction Technology

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

수록 감소하는 경향을 보였다.

이러한 원인으로 Chae et al.(2015)는 세립분 함유량에 따라 변화되는 부동수분의 양을 원인으로 제시하고 있으나 정확한 규명은 이루어지지 않았으며, 실질적으로 세립분의 증가로 인한 입자 간의 거리 감소 및 이로 인한 입자 간 얼음의 체적 감소 및 부착력 감소 등을 확인하여 볼 필요가 있을 것으로 판단하였다.

따라서 본 연구에서는 0%, 5%, 10%, 15%의 네 종류의 세립분(카올리나이트) 함유량을 가진 동결 사질토에 대하여 -5, -10, -15도에서 공시체를 제작하여 X-ray CT 촬영을 통하여 입자 간의 거리를 확인하여 동결 사질토의 응력-변형률-강도에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

일반적으로 CT 촬영은 의학적인 목적으로의 활용이 잘 알려져 있으나 국내의 경우 경량골재와 경량골재 콘크리트의 내부를 분석하기 위해 Micro CT 촬영 기술을 이용하기 위한 연구들이 활발히 진행 중에 있으며(Chung et al., 2011; Jeon & Youm, 2011), 지반공학 분야에서도 아스팔트 혼합물의 공극특성을 파악하기 위한 연구(Shin et al., 2012)와 다공질 암석 및 사질토를 대상으로 투수 및 불포화 특성을 파악하고 3차원 간극 이미지 획득과 정량화된 간극 구조를 산출하기 위해 Micro CT 촬영 기술을 활용하고 있다(Jung & Yun, 2011; Shin et al., 2011; Kim et al., 2011; Park et al., 2013; Suh et al., 2015).

2. 시험방법 및 시험계획

2.1 X-ray Computed Tomography 촬영

X-ray Computed Tomography(CT) 촬영은 내부의 단층영



Fig. 1. X-ray CT scanner at KICT

상을 재구성하는 비파괴 검사의 한 방법으로 물질을 투과하는 방사선을 이용해 획득한 투과 영상을 통해 다양한 위치의 정보를 획득하고 수학적으로 연산하는 과정을 거쳐 피사체 내부의 투과정보를 얻는 기술이다(Kim et al., 2011). 지반재료를 대상으로 한 연구는 1990년대 중후반을 기점으로 프랑스 등 유럽과 일본의 연구 그룹이 중심이 되어 시작되었으며 본격적인 연구가 시작된 지 얼마 되지 않은 최신의 학문 분야이다.

Fig. 1은 현재 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 X레이 CT 장비를 나타내고 있다. 이는 지반공학 분야에 활용하기 위하여 국산 X레이 CT 장비를 개조하여 제작한 장비이며 점토, 표준사, 풍화토 등에 대한 촬영이 이루어졌다.

X레이 CT 촬영은 광원으로부터 조사된 X레이 광선이 동일한 간격으로 회전하는 테이블 위에 놓인 시료를 통과하며 산란과 흡수에 의해 감쇠되어 투영되게 된다. 이렇게 투영된 이미지는 이미지 프로세싱 시스템에 의해 2차원 디지털 배열로 전환되며 최종적으로 획득한 투영 이미지에 의해 3차원 이미지로 재구성된다. 2차원 이미지를 3차원으로 적층하여 3차원 이미지를 구성하는 과정과 입자와 간극의 구분의 오차를 보정하는 과정은 Jung & Yun(2011)에 자세히 나타나 있다.

단층 화상에서 주로 백색은 밀도가 높은 물질을 나타내며, 검은색은 주로 밀도가 낮은 물질을 나타낸다. 또한 CT 값은 시료를 통과하는 X레이의 투과량에 의한 산출식으로 결정되며 X레이와 샘플 간의 거리와 샘플의 두께에 영향을 받게 된다(Kim et al., 2011). Table 1은 본 연구에서 사용된 X선 CT 촬영의 성능을 정리한 것이다. 본 연구에서 사용된 Micro X-ray CT 장비에 대한 자세한 설명 및 구동 원리, 장비보정에 대한 과정과 원리는 Kim et al.(2011)에서 찾을 수 있다.

2.2 시험 재료 및 시험계획

본 연구에서 사용된 시료는 조립질 재료인 주문진 표준사에 세립질 재료인 카올리나이트를 0, 5, 10, 15%를 혼합하여 상대밀도 77%의 상대적으로 조밀한 시료를 조성하였다. 조립질인 주문진 표준사는 비중 2.67에 최대 건조단위

Table 1. Performance of Micro X-ray CT equipment

Source	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum power : 0 kV to 90 kV • Maximum visibility : 5 microns (at 4W)
Detector (Camera)	<ul style="list-style-type: none"> • Maximum picture size : 49.2 mm × 49.2 mm • Limit resolution : 10 Lp/mm
Manipulator	<ul style="list-style-type: none"> • Rotation resolution : 2.5/1000 deg • Wobble : about 0.01 mm

중량 16.7KN/m^3 , 최소 건조단위중량 13.3KN/m^3 으로서 통일분류법상 입도분포가 좋지 않은 빈입도(SP)로 나타났다. 세립질인 카올리나이트는 비중 2.49에 소성지수(PI) 16.13으로 소성성이 낮은 실트(ML)로 나타났다. 공시체는 포화함수비로 -5, -10, -15 $^{\circ}\text{C}$ 로 동결시켜 시료를 준비하였다. 시료의 기본 물성과 공시체 제작의 자세한 과정은 Chae et al. (2015)에서 찾을 수 있다.

본 연구에서는 동결 사질토 내 세립분 함유량에 따른 사질토 입자 간의 거리분석을 통하여 강도 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 X선 CT 촬영을 통하여 각 시료들에 대하여 가장 가까운 사질토 입자 간의 거리(nearest spacing) 및 평균 거리(average spacing)를 파악하고자 하였다.

3. X-ray CT 촬영 결과

3.1 X-ray 촬영 원본 이미지 관찰

3차원 이미지 구성에 앞서 X선 촬영 원본 이미지를 관찰하였다. Fig. 2는 -5 $^{\circ}\text{C}$ 로 동결된 시료의 단층 이미지를 나타내고 있다. 분석 시편의 직경은 48mm이고 촬영에 적용된 pixel pitch는 47 μm 이다. 가시적인 관찰 결과 조립질 재료 사이의 거리는 큰 차이가 없는 것으로 보이며 특이할 만한 사항은 세립분 함유량이 0, 5%인 공시체의 경우 검은색으로 보이는 불균질한 간극이 다수 관찰된다는 점이다.

3.2 3차원 CT 촬영 분석 결과

세립분 함유량과 동결온도에 따른 동결 사질토의 역학적

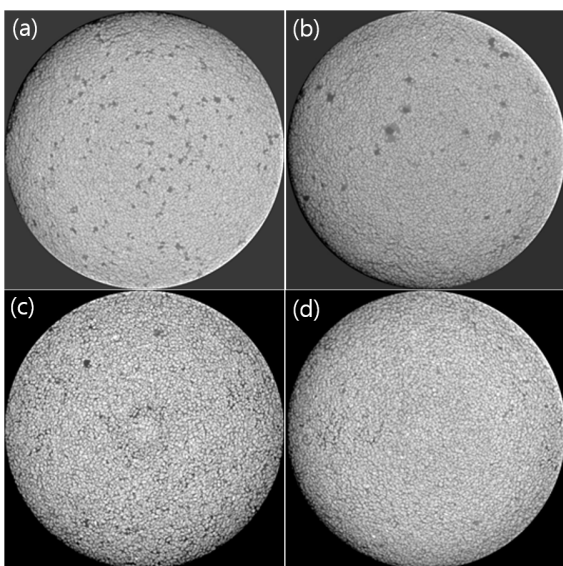


Fig. 2. X-ray 2D sliced images of tested specimens; (a) -5 $^{\circ}\text{C}$ without fine, (b) -5 $^{\circ}\text{C}$ with 5% fine, (c) -5 $^{\circ}\text{C}$ with 10% fine, (d) -5 $^{\circ}\text{C}$ with 15% fine

특성 변화의 원인으로 추정되는 조립질 입자들의 거리 변화를 파악하기 위하여 3차원 CT 촬영을 통하여 분석하고자 한 항목은 입자 간의 최단거리와 평균거리이다.

입자 간의 거리를 분석하기 위해서 우선 Fig. 2에 나타난 2차원 이미지 중심 부분을 정사각형으로 자르고, 밝게 표시된 조립질 입자와 검게 표시된 간극을 구분하기 위한 명도의 한계값(threshold) 선정하여 이진화된(binary) 이미지를 생산하고 저장하게 된다. 이렇게 생산된 1024개의 이미지 가운데 100번부터 900번까지 801개의 이미지를 3차원으로 쌓게 되어 Fig. 3과 같은 3차원 이미지를 얻게 된다.

이렇게 쌓인 이미지에서 원하지 않는 입자의 경계면 접촉 부분을 분리하기 위해서 이미지상에서 조립질 입자의 표면을 깎아내게(erosion) 된다. 개별 조립질 입자에 인식부호를 붙이며 입자의 무게중심(centroid)의 좌표를 산출하게 된다.

입자 간의 최단거리를 산정하기 위해서는 1개의 조립질 입자를 기준으로 가장 가까운 곳에 위치한 입자를 탐색하고 거리를 측정하여 입자 간의 최단거리를 결정하게 되며, 흙 입자와 간극의 구분을 위한 명도의 한계값을 바꾸어가며 계산된 최단거리의 평균과 표준편차를 계산하게 된다.

입자 간의 평균거리를 산정하기 위해서는 추출된 조립질 입자를 기준으로 개별 입자로부터 도메인 내에 존재하는 모든 조립질 입자 간의 거리를 계산하고 이 과정을 도메인 내에 모든 조립질 입자에 적용한 후 평균값을 계산하게 된다.

최단거리는 조립질 입자들이 뭉쳐져 클러스터 형상을 띠고 있을 경우, 전체 도메인에서의 불균질성을 반영하지 못하는 반면, 평균 거리는 전체 시편에서의 상호 거리 값에 큰 차이가 있을 경우, 예를 들어 입자의 크기가 큰 자갈이 존재하거나 입자보다 큰 간극의 존재 유무를 판단할 때 유용하게 쓰일 수 있다.

X선 CT 촬영을 통한 분석의 경우 입자와 간극을 채운

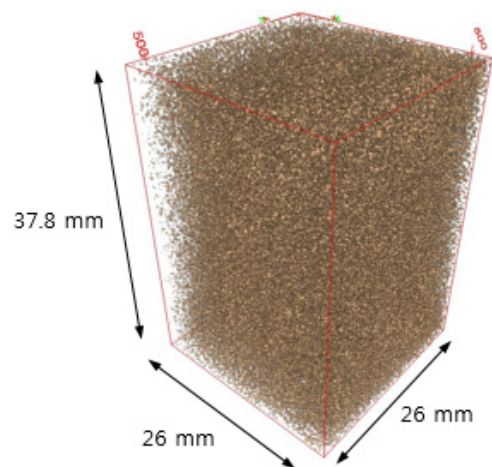


Fig. 3. 3D stacked sand particle image of sand only specimen frozen at -5 $^{\circ}\text{C}$

재료 간의 X선 CT 값의 미세한 차이로 인하여 이중 물질 간의 분리는 다소 제한적일 수 있으나 앞서 언급한 이미지 상의 입자 표면 깎기(erosion)에 의해 대상 이미지의 손실

없이 무게 중심을 산출할 수 있었으며, 이러한 과정에서 불완전한 분리 및 노이즈로 인하여 거리 계산에 오차가 발생하였을 수 있다.

명도 한계값(threshold)을 2500, 2550, 2600, 2650으로 총 4가지를 설정하여 이진화를 하고 최단거리 및 평균거리를 산정해 본 결과, 세립분 함유량에 따른 조립질 입자 간의 거리 변화는 유의미한 수준으로 나타나지 않았다. 명도 한계값 2650을 기준으로 산정된 최단거리 및 평균거리 그리고 각각의 표준편차를 Fig. 4에 도시하였다. 최단거리는 0.429mm에서 0.468mm까지의 편차를 보였으나, 동결온도 및 세립분 함유량에 따른 유의미한 경향은 찾을 수 없었다. 평균 거리 또한 19.687mm에서 20.178mm로 최단거리와 마찬가지로 동결온도 및 세립분 함유량에 따른 큰 변화는 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

세립분 함유량에 따른 동결 사질토의 강도 특성 변화의 원인으로 제시되었던 조립질 입자 간의 거리 변화를 파악하기 위하여 세립분 함유량과 동결온도를 달리한 동결 사질토 공시체에 대하여 X선 CT 촬영을 수행하여 조립질 입자 간의 거리를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

세립분 함유량 및 동결 온도 등 시편 생성 조건 및 흙 입자를 규명하는 명도 한계값에 따라 입자 간 거리 값에 차이는 발생하나 그 변화의 양상이 일정하며 사질토 입자 간의 거리 값이 크게 달라지지 않음을 확인하였다.

사질토 입자 간의 거리에 의한 강도 및 강성 등의 역학적 거동이 달라지기 위해서는 사질토 입자가 점성토 입자 매트릭스 안에 삽입된 형태로 존재하여야 할 것으로 판단되며 이를 위해서는 본 연구에서 수행된 세립분 함유량보다 더 많은 세립분 함유량이 요구되어진다.

따라서 CT 이미지를 통해 본 시편들에서의 강도 차이는 조립질 입자 간의 벌어짐 현상이 아님을 확인하였으므로, 세립분 함유량 15% 이하의 동결사질토의 역학적 거동을 분석할 경우, 조립질 재료의 입자 간 이격거리보다 영하의 온도에서도 얼지 않는 부동수분의 영향이 더 큰 것으로 판단되며 이를 규명하는 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원 (13IFIP-B06700801) “동토지역 자원이송망 설계·시공 및

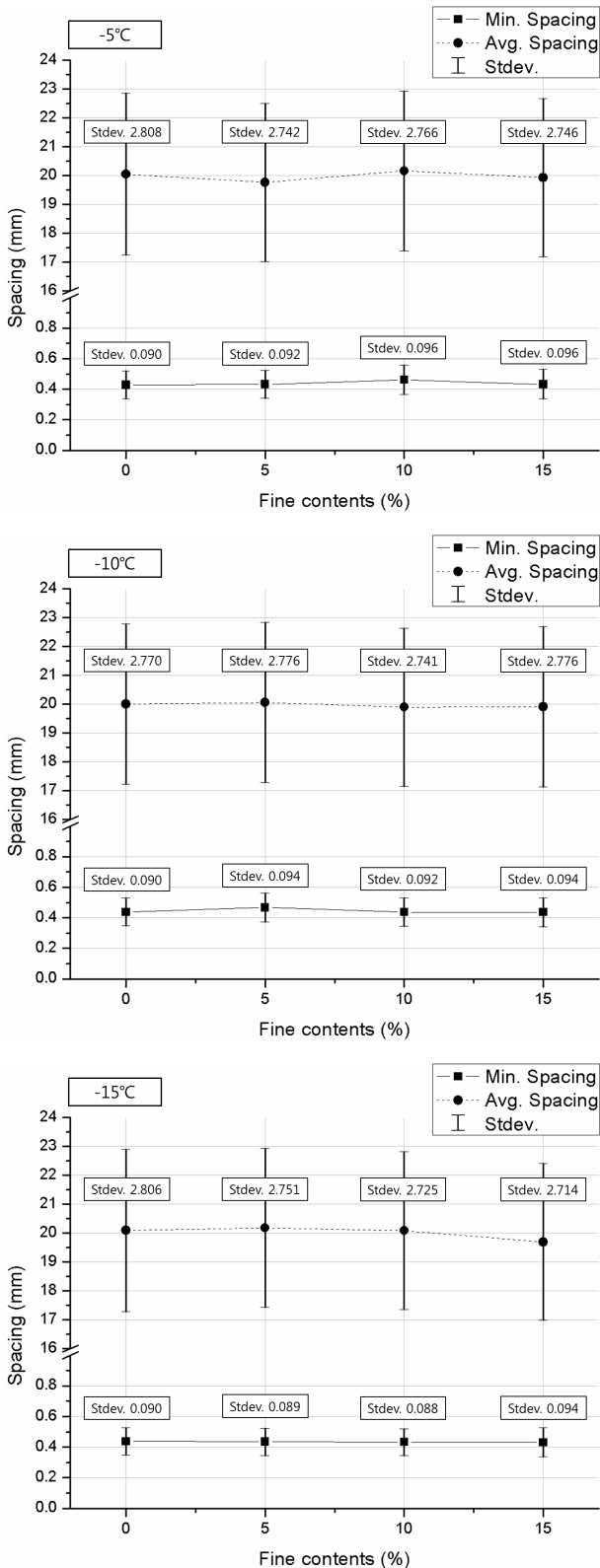


Fig. 4. Minimum and average spacing of sand particles at various freezing temperatures and fine contents

유지관리 기술개발”과제 및 한국연구재단의 이공분야기초 연구사업의 연구비 지원(NRF-2014R1A1A1002401)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Andersland, O. B. and Ladanyi, B. (2004), “Frozen ground engineering second edition”, John Wiley & Sons, New York, pp. 20~55.
2. Anderson, D. M. and Morgenstern, N. R. (1973), “Physics, chemistry and mechanics of frozen ground”, National Academy of Sciences, pp. 257~288.
3. Bourbonnais, J. and Ladanyi, B. (1985), “The mechanical Behavior of Frozen Sand Down to Cryogenic Temperatures”, Proceedings, 4th International Symposium of Ground Freezing, Sapporo, Japan, pp. 235~244.
4. Bragg, R. A. and Andersland, O. B. (1982), “Strain rate, Temperature and Sample Size Effects on Compression and Tensile Properties of Frozen Sand”, Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 28, pp. 35~46.
5. Chae, D., Hwang, B. and Cho, W. (2015), “Stress-Strain-Strength Characteristics of Frozen Sands with Various Fine Contents”, Journal of Korean Geo-environmental Engineering, 16(6), pp. 31~38 (in Korean).
6. Chung, S. Y., Kim, Y. J., Yun, T. S. and Jeon, H. K. (2011), Evaluation of void distribution on lightweight aggregate concrete using Micro CT image processing, Journal of Korean Society of Civil Engineering, Vol. 31, No. 2 A, pp. 121~127 (in Korean).
7. Freitag, D. R. and McFadden, T. (1997), “Introduction to cold regions engineering”, New York: ASCE Press, pp. 291~301.
8. Haynes, F. D. and Karalius, J. A. (1977), “Effect of Temperature in the Strength of Frozen Silt”, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Research Report, 350, pp. 1~27.
9. Hivon, E. G. and Sego, D. C. (1995), “Strength of frozen saline soils”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32, No. 2, pp. 336~354.
10. Jeon, H. K. and Youm, K. S. (2011), Analysis of lightweight aggregate and lightweight aggregate concrete through the use of Micro CT technology, Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 11, No. 3, pp. 6~14 (in Korean).
11. Jung, Y. J. and Yun T. S. (2011), Quantification of 3D pore structure in glass bead using Micro X-ray CT, Journal of the Korean geotechnical society, Vol. 27, No. 11, pp. 83~92 (in Korean).
12. Kim, J. T., Takahashi, M., Choo, C. O., Ro, B. D. and Jeong, G. C. (2011), Comparison of X-ray CT analysis of rocks and low permeability, KSEG Conference, Jeju, Korea, pp. 170~172 (in Korean).
13. Park, H., Choo, C. O. and Jeong, G. C. (2013), Micro focus X-ray and permeability characteristics of damaged rocks, proceedings of KSEG Spring Conference, pp. 113~115 (in Korean).
14. Shin, H. S., Kim, K. Y., Heo, S. J., Yim, S. B., Kwon, Y. C. and Kim, H. T. (2011), Estimation of void ratio of sandy soil using X-ray CT scan, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 1, pp. 170~172 (in Korean).
15. Shin, K. H., Kim, S. K. and Lee, K. H. (2012), Evaluation of void distribution of hot mix asphalt using Micro CT scanner, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 12, No. 3, pp. 169~175 (in Korean).
16. Suh, H. S., Yeom, S., Yun, T. S., Kim, K. Y. and Seo Y. S. (2015), Evaluation of shape parameters by 3D X-ray CT and image processing, Korean Society of Civil Engineering Conference, pp. 35~36 (in Korean).
17. Wolfe, L. H. and Thieme, J. O. (1964), “Physical and Thermal Properties of Frozen Soil and Ice”, Society of Petroleum Engineering Journal, Vol. 4, No. 01, pp. 67~72.