

## 직접전단시험에 의한 모래의 전단강도에서 시편의 크기효과

## Scale Effects of the Specimen on Shear Strength of sand by Direct Shear Test

김준석<sup>1\*</sup> · 김지현<sup>2</sup>Joon-Seok Kim<sup>1\*</sup>, Ji-Hyun Kim<sup>2</sup><sup>1</sup>Professor, Department of civil and environmental engineering, Chungwoon University, Incheon, Republic of Korea<sup>2</sup>Graduate student Dept. of Civil Engineering, Chungwoon University, Incheon, Republic of Korea

\*Corresponding author: Joon-Seok Kim, jskim@chungwoon.ac.kr

## ABSTRACT

**Purpose:** An experimental study was conducted on the sand samples for the size effect of the test specimens, one of the problems of the direct shear test. **Method:** Jumunjin standard sand, a representative sand of Korea, was used as sand sample. The large direct shear test was performed to analyze the shear strength at 50%, 60%, 70%, and 80% relative density, and then the comparative results were compared with the test results of the small direct shear test. **Result:** It was analyzed that the internal friction angle of the small shear tester tended to be relatively large in the dense region. It was analyzed that the results of the large shear tester tend to be relatively large in the region of medium relative density. **Conclusion:** The size effect on the samples in the direct shear test on sandy soil was analyzed to be relatively small.

**Keywords:** Direct shear test, Standard sand, Relative density, Size effect, Internal friction angle

## 요약

**연구목적:** 직접전단시험의 문제점 중에 하나인 시험시편의 크기효과에 대하여 모래시료를 대상으로 실험적 연구를 수행하였다. **연구방법:** 우리나라를 대표하는 모래인 주문진 표준사를 연구 대상으로 사용하였다. 상대밀도 50%, 60%, 70%, 80%에 대한 전단강도를 분석하기 위하여 대형직접전단시험을 수행한 후 소형직접전단기의 시험결과와 비교분석을 수행하였다. **연구결과:** 상대밀도가 촘촘한(dense) 영역에서는 소형전단시험기의 내부마찰각이 비교적 큰 경향이 있는 것으로 분석되었다. 상대밀도가 중간(media) 정도의 영역에서는 대형전단시험기의 결과가 비교적 큰 경향이 있는 것으로 분석되었다. **결론:** 모래흙에서 직접전단시험의 시료에 대한 크기 효과는 비교적 크지 않은 것으로 분석되었다.

**핵심용어:** 직접전단시험, 표준사, 상대밀도, 크기효과, 내부마찰각

Received | 15 September, 2019

Revised | 11 October, 2019

Accepted | 23 December, 2019

 OPEN ACCESS


This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

건설에 있어서 지반구조물을 경제적이면서도 안전하게 설계하기 위해서는 지반의 전단강도를 정확하게 평가해야한다. 전단강도를 평가하기 위한 실내시험은 삼축압축시험과 직접전단시험 등 여러 방법이 있으며, 또한 여러 종류의 현장시험이 사용되고 있다. 실내시험

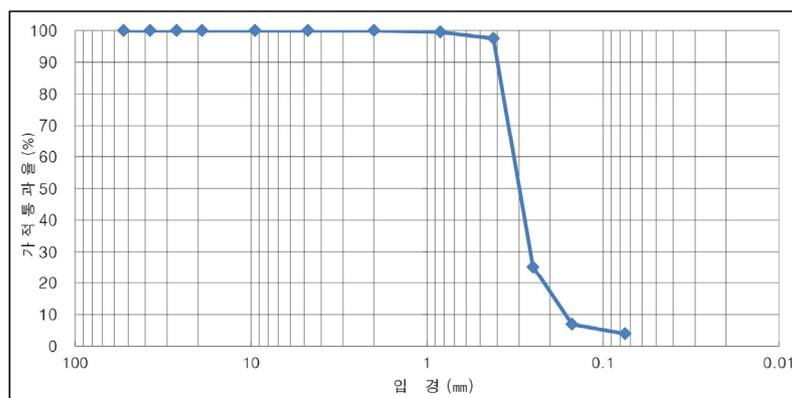
의 중요한 시험법인 삼축압축시험은 다양한 경계조건을 구현할 수 있어서 비교적 실무 상황을 정교하게 구현할 수 있다는 장점이 있으나 시험 과정이 복잡하고 시험시간이 비교적 많이 걸리는 단점이 있다(Jewell, 1989). 그에 비하여 직접전단시험은 시험의 소요시간이 적게 걸리며, 시험 방법이 비교적 간단하다는 장점이 있다. 이러한 이유 때문에 실무에서는 직접전단시험을 비교적 많이 수행하게 된다. 직접전단시험의 실무적 장점에도 불구하고 직접전단시험은 다양한 경계조건을 정교하게 구현하기 어려우며 전단 중에 설정된 전단면을 따라 불균등한 응력 전이 현상이 발생하여 진행성 파괴가 일어나게 되어 이론적 분석과는 상이한 실험이 진행될 수 있다는 문제점이 있다(Lee, 2017). 직접전단시험은 이러한 단점을 보완하기 위한 연구로서 시험기의 개선, 영향인자들에 대한 분석, 전단강도와 팽창각 사이의 관계 연구 등 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 이러한 직접전단시험의 문제점 중에서도 응력전이현상과 직접적인 관계가 있는 것은 시험시편의 크기이다. 즉, 시험시편의 경계조건에 따라 동일한 시료의 시험결과가 영향을 받을 수 있다는 연구가 지속적으로 수행되어 왔다(Kim et al., 2000).

본 연구에서는 이와 같은 직접전단시험의 문제점 중에 하나인 시험시편의 크기효과에 대하여 모래시료를 대상으로 실험적 연구를 수행하였다. 시험시편의 크기효과는 대상토질의 종류에 따라 상이한 결과가 도출될 수 있으므로 본 논문에서는 모래시료를 대상으로 대형직접전단시험기를 이용한 상대밀도에 따른 전단강도실험을 실시하여 전단특성을 분석하고, 소형직접전단시험기에서 분석된 전단 특성과 비교분석하였다(Kim, 2015).

## 실험방법

### 실험재료

본 연구에서는 모래시료로서 우리나라를 대표하는 모래인 주문진 표준사를 사용하였다. 상대밀도 50%, 60%, 70%, 80%에 대한 전단강도를 분석하기 위하여 대형직접전단시험을 수행한 후 소형직접전단기의 시험결과와 비교분석을 수행하였다. 주문진 표준사는 Fig. 1과 같은 입도분포로서 통일분류법으로 SM으로 분류되며, 표1과 같이 함수비 0.16%, 비중 2.67, 단위중량 등의 특성으로 구성되었다.



**Table 1.** Engineering characteristics of the sample

구분 최대건조단위중량( $\gamma_{d_{max}}$ )	최소건조단위중량( $\gamma_{d_{min}}$ )	함수비(%)	비중
16.70kN/m <sup>3</sup>	13.80kN/m <sup>3</sup>	0.16	2.67

**실험장치**

대형직접전단시험기(Fig. 2)는 넓이 900cm<sup>2</sup>(30cm\*30cm), 깊이 23cm의 크기의 전단상자를 이용하여 시료의 상대밀도를 조정후 일정한 수직응력을 가한 상태에서 수평방향으로 전단력을 가함으로써 전단상자 내의 전단면에서 시료가 전단 파괴 되도록 하여 전단강도를 측정하는 시험기이다. 시료조성은 적절한 상대밀도를 얻을 수 있도록 높이를 조절하는 낙하방식을 이용하였다. 시험기는 전단상자와 재하장치로 구성된다. 전단상자는 상하로 분리되어 있고, 아랫부분은 하부 전단상자 받침틀에 고정되어 있다. 수직하중은 가압판의 중심에 있는 수직응력 재하장치를 통해 전달되며, 윗부분은 검력계(Proving ring)와 수평으로 연결되어 있어 힘이 전달될 때의 힘을 읽을 수 있다. 재하장치는 수직력을 작용시키기 위한 것과 수평력을 작용시키기 위한 것의 두 가지가 있다. 일반적으로 수직방향은 응력제어, 수평방향은 변형제어 방식으로 힘을 가한다. 수평방향으로는 분당 0.0002 ~ 2.0mm의 속도를 가할 수 있도록 구성되어 있다(Hong et al., 2015). 소형직접전단시험기(Fig. 3)는 직경 6cm, 깊이 2cm의 크기의 전단상자를 이용하여 시료의 상대밀도를 조정후 시료에 일정한 수직응력을 가하면서 수평방향으로 전단력을 가하여 전단상자 내의 전단면에서 시료가 전단파괴되도록 하여 전단강도를 측정하는 시험기이다. 이러한 소형직접전단시험기는 대형직접전단시험기에 비하여 비교적 다루기 쉽고, 빠르게 실험을 할 수 있는 장점이 있다(Ju et al., 1998).



**Fig. 2.** Large Direct Shear Testing Machine



**Fig. 3.** Small Direct Shear Tester

**실험결과**

**직접전단시험결과**

대형직접전단시험은 상대밀도 50%, 60%, 70%, 80%에 대하여 연직응력 20 kPa, 35kPa, 50kPa에 대하여 각각 3회 씩 시험을 실시하였으며 시험결과는 Figs. 4~7과 같다. 각각의 시험결과를 이용하여 Figs. 8~11와 같이 각각의 상대밀도에 따른

수직응력-전단강도 그래프를 작성하였다. 또한, Fig. 8~11에서 전단파괴점들을 이용하여 파괴포락선을 작성하였다. Figs. 8~11의 파괴포락선으로부터 점착력  $c$ 와 내부마찰각  $\phi$ 를 분석하여 표2와 같이 정리하였다. 표2와 같이 상대밀도 50%에서 점착력( $c$ )은  $8.89kPa$ , 내부마찰각( $\phi$ )은  $32.57^\circ$ , 상대밀도 60%에서 점착력( $c$ )은  $12.65kPa$ , 내부마찰각( $\phi$ )은  $38.28^\circ$ , 상대밀도 70%에서 점착력( $c$ )은  $20.54kPa$ , 내부마찰각( $\phi$ )은  $40.84^\circ$ , 상대밀도 80%에서 점착력( $c$ )은  $24.11kPa$ , 내부마찰각( $\phi$ )은  $42.05^\circ$ 로 각각 나타내었다. Fig. 12에 대형전단시험기로부터 얻은 상대밀도와 내부마찰각의 관계를 나타내었다. 동일한 시료에 대한 소형직접전단시험결과는 표3과 같이 상대밀도 50%에서 점착력( $c$ )은  $9.08kPa$ , 내부마찰각( $\phi$ )은  $31.02^\circ$ , 상대밀도 60%에서 점착력( $c$ )은  $17.91kPa$ , 내부마찰각( $\phi$ )은  $35.53^\circ$ , 상대밀도 70%에서 점착력( $c$ )은  $16.97kPa$ , 내부마찰각( $\phi$ )은  $42.52^\circ$ , 상대밀도 80%에서 점착력( $c$ )은  $22.61kPa$ , 내부마찰각( $\phi$ )은  $44.34^\circ$ 로 각각 나타내었다(Kim, 2015). Fig. 13에 소형전단시험기로부터 얻은 상대밀도와 내부마찰각의 관계를 나타내었다.

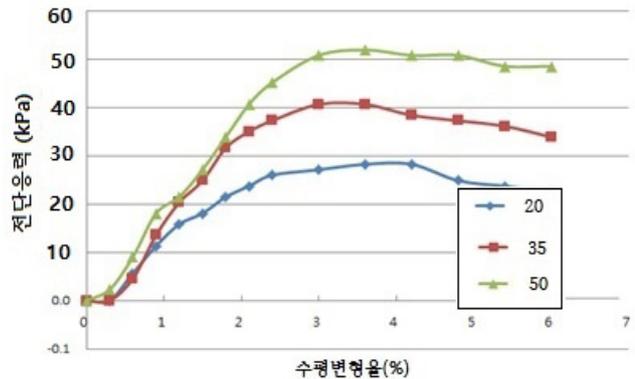
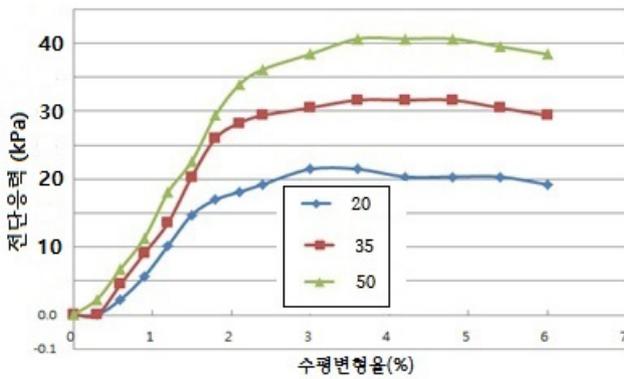


Fig. 4. Shear stress and horizontal strain at 50% relative density Fig. 5. Shear stress and horizontal strain at 60% relative density

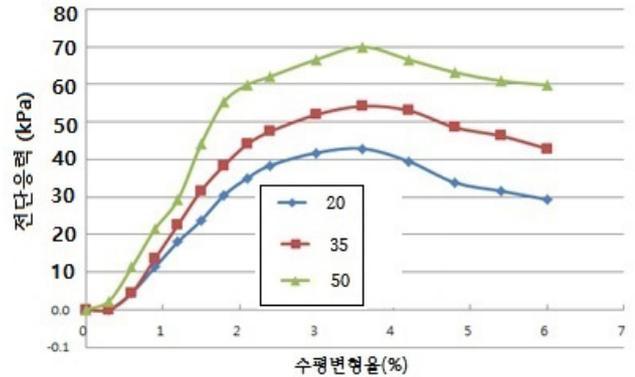
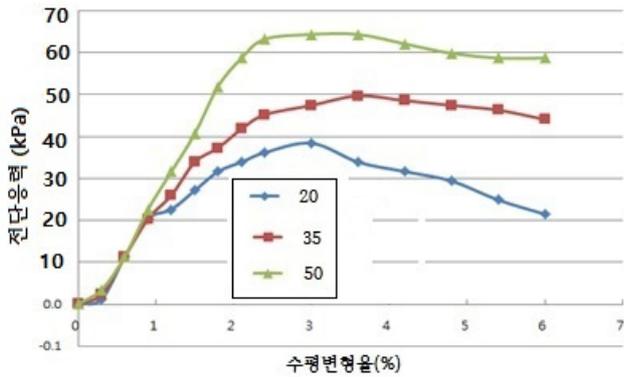


Fig. 6. Shear stress and horizontal strain at 70% relative density Fig. 7. Shear stress and horizontal strain at 80% relative density

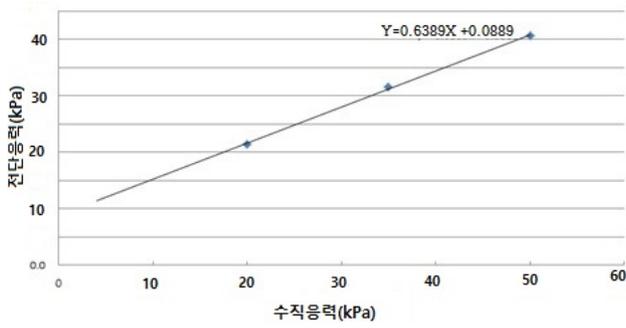


Fig. 8. Failure envelope at 50% relative density

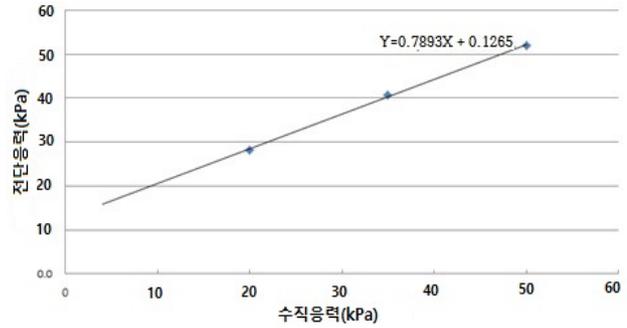


Fig. 9. Failure envelope at 60% relative density

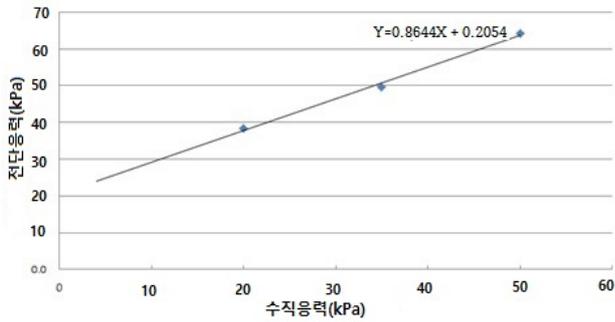


Fig. 10. Failure envelope at 70% relative density

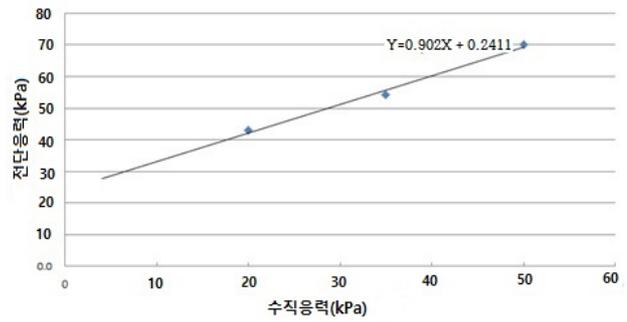


Fig. 11. Failure envelope at 80% relative density

Table 2. Large shear test results

상대밀도	점착력(c)(kPa)	내부마찰각( $\phi$ )
50%	8.89	32.57 °
60%	12.65	38.28 °
70%	20.54	40.84 °
80%	24.11	42.05 °

Table 3. Small shear test results

상대밀도	점착력(c)(kPa)	내부마찰각( $\phi$ )
50%	9.08	31.02 °
60%	17.91	35.53 °
70%	16.97	42.52 °
80%	22.61	44.34 °

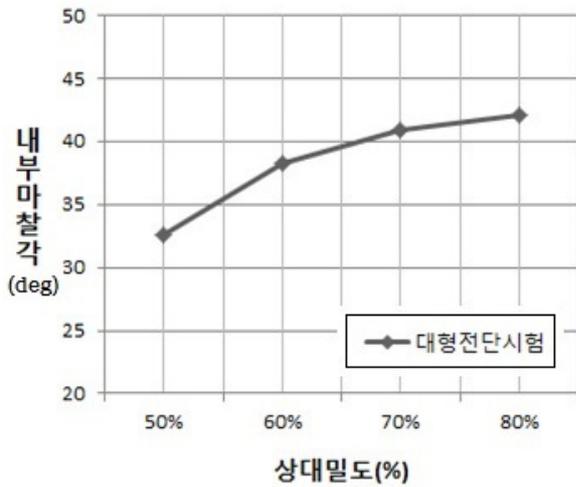


Fig. 12. Internal friction angle by large shear test

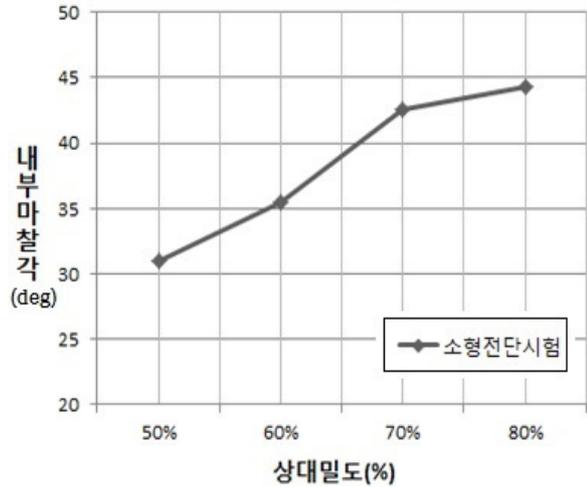


Fig. 13. Internal friction angle by small shear test

### 시험결과분석

본 절에서는 모래흙에 대한 전단강도 특성에 있어서 대형전단시험과 소형전단시험의 결과에 대한 비교분석을 실시하였다. 전단강도의 요소 중 점착력부분은 마찰력부분에 비하여 모래흙에서는 비교적 작은 요소로서 실무에서는 대부분 무시하는 요소이다. 일반적으로 전단강도의 결정은 마찰력 부분이 중요한 역할을 하게 된다. 따라서, 본 절에서는 마찰력부분인 내부마찰각에 대하여 분석을 수행하였다. 시료크기에 따른 내부마찰각의 변화를 Fig. 14에 비교하였다. Fig. 15에서 대형전단 시험과 소형전단시험의 상대밀도에 따른 내부마찰각의 변화를 비교해서 직선방정식으로 분석하였다. Fig. 15에서 두 시험기의 결과는 비교적 유사한 경향을 보이고 있으며, 좀 더 상세한 경향으로는 비교적 상대밀도가 촘촘한(dense) 영역에서는 소형전단시험기의 결과가 비교적 큰 경향이 있으며, 상대밀도가 중간(medium)정도의 영역에서는 대형전단시험기의 결과가 비교적 큰 경향이 있는 것으로 분석되었다.

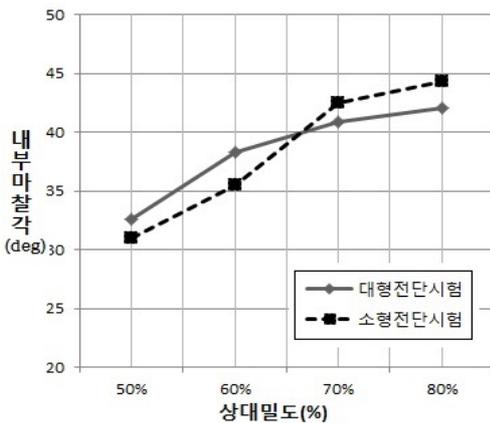


Fig. 14. Comparison of Internal Friction Angle with Sample Size

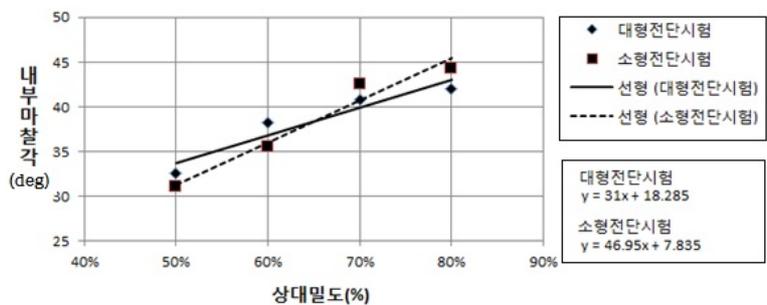


Fig. 15. Relationship between internal friction angle of the relative density at the shear test

## 결론

본 연구에서는 직접전단시험의 불확실한 경계조건의 하나인 시험시편의 크기효과에 대하여 모래시료를 대상으로 실험적 연구를 수행하였다. 시험시편의 크기효과는 대상토질의 종류에 따라 상이한 결과가 도출될 수 있으므로 본 논문에서는 모래시료인 주문진 표준사를 대상으로 대형직접전단시험을 수행하여 결과를 분석한 후에 소형직접전단시험결과와 비교분석하였으며 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 모래흙에서 직접전단시험의 시료에 대한 크기 효과는 비교적 크지 않은 것으로 분석되었다.
- 2) 상대밀도가 촘촘한(dense) 영역에서는 소형전단시험기의 내부마찰각이 비교적 큰 경향이 있는 것으로 분석되었다.
- 3) 상대밀도가 중간(medium)정도의 영역에서는 대형전단시험기의 결과가 비교적 큰 경향이 있는 것으로 분석되었다.

## Acknowledgment

본 연구는 2019년도 청운대학교 학술연구조성비의 지원에 의해 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] Hong, Y.H., Byen, Y.H., Chai, J.G., Lee, J.S. (2015). "Shear Behavior of Sand Samples According to the Type of Shear Box in the Direct Shear Test" *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 31, No. 3, pp. 51-52.
- [2] Jewell, R.A. (1989). "Direct Shear Test On Sand", *Geotechnique*, Vol. 39, No. 2, pp. 309-322.
- [3] Ju, J.W., Park, C.S., Choi, H.-N. (1998). "Triaxial test of Jumunjin standard sand according to relative density", *Korean Society of Civil Engineers Conference*, Vol. 2, pp. 73-76.
- [4] Kim, J.G., Choi, Y.H., Jung, J.Y., Kang, K.S. (2000). "Study on Shear Constants of Jumunjin Standard sand According to Direct Shear Test Type", *Korean Society of Civil Engineers Conference*, Vol. 2, pp. 439-442.
- [5] Kim, H.G. (2015). "A Study on Shear Strength of Sand Using Large Shear Test", *Chungwoon University Master's Thesis*, Incheon, Korea
- [6] Lee, S.D. (2017). "Soil mechanics" *Gumi Library*, pp. 239-292