# 인공모래의 최소간극비 산정 시 플루베이션과 진동대 시험법의 적용성 비교
# Comparison of Pluviation and Vibrating table method on the Minimum void ratio of crushed sand

조용순[1], Youg-Soon, Cho, 김래현[2], Raehyun, Kim, 김재정[1], Jae-Jeong, Kim 이우진[3], Woojin Lee

[1]고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.
[2]고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 박사과정, Ph.D Student, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.
[3]고려대학교 건축·사회환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ. (woojin@korea.ac.kr)

**SYNOPSIS :** The relative density of soil indicate loose and dense state of sand. Because sand is low compressibility, initial relative density of sand is important effect factor of compression and shear behavior. To measure exactly relative density, the exactly maximum and minimum void ratio was determinated by laboratory tests. Generally, vibrating table method is adapted for minimum void ratio(KS F 2345). However KS F 2345 is not consider the particle break during the vibrating table test. In this study, The minimum void ratio is compared with a method of Pluviation and Vibrating table test results using the K-7(crushed sand). It is concluded that the K-7 sand particles were crushed during the vibrating table test and vibrating table test is not a suitable test for a crushed sand $e_{min}$.

**Key words :** pluviation, vibrating table, minimum void ratio, crushed sand

## 1. 서 론

최근 국내에서는 자연사의 수급 부족으로 인해 인공적으로 파쇄된 인공사를 많이 사용하고 있다. 대표적인 자연사인 주문진사도 현재 그 양이 현저히 부족하여 인공적으로 만들어지고 있는 실정이다. 인공사는 모암을 파쇄하여 인공적으로 만들었기 때문에 자연사에 비해 모래 본래의 강도가 낮고, 입도분포 또한 균질하지 못하며, 미세균열(마이크로크랙) 등을 내포하고 있어 규석모래의 본질적인 특성을 가지지 못한다. 모래는 압축성이 낮으므로 초기에 조성되어 있는 상대밀도가 압축 및 전단거동의 중요한 영향인자로 작용한다. 따라서 상대밀도를 정확하게 분석하기 위해서는 대상 사질토가 가질 수 있는 최대·최소 간극비를 올바르게 측정해야 한다. 최대·최소 간극비는 상대밀도에 직접적으로 영향을 미치므로 많은 연구를 통해 여러 가지 시험법들이 제시되었으며, 현재 국내에서는 ASTM D4253-83(1983)에 근거하여 만들어진 KS F 2345(2004)의 진동대 시험법(Vibrating table method)을 표준시험법으로 규정하고 있다. 그러나 ASTM D4253-83과 KS F 2345는 자연사와 인공사에 대한 시험법의 구분이 없으며 모래의 종류에 상관없이 일률적으로 사용되고 있다. Miura와 Toki(1982)는 균질한 상대밀도의 사질토 시료를 조성하기 위해 MSP법(multiple sieve pluviation method)을 제안하였고, MSP는 현재 최소 간극비를 산정하기 위한 플루베이션 시험법(Pluviation method)으로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 인공사인 K-7호사에 대해 최소 간극비를 산정하는 대표적인 시험법인 플루베이션 시험법과 진동대 시험법을 실시하여 두 시험법으로 산정한 최소 간극비를 비교하였다.

## 2. 시료기본물성

본 연구에 사용된 K-7호사는 통일분류법(USCS)상 SP에 해당되는 모래로써 기본 물성치는 표 1과 같다. 또한 그림 1과 같이 균등계수와 곡률계수가 작은 입도분포곡선을 가진다. K-7호사는 모암인 규석을 인공적으로 파쇄하여 생산된 인공모래로써, 평균입경은 0.17mm을 가진다. XRF 성분분석 시험 결과(표 2) $SiO_2$가 98% 이상 차지하는 석영질 모래이며 조도(roundness)는 중간모난~모난 정도인 것으로 나타났다.

표 1. 시험모래 기본물성

| 모래 | $G_s$ | $D_{10}$(㎜) | $D_{50}$(㎜) | $C_u$ | $C_c$ | 조도 | 광물특성 | USCS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| K-7호사 | 2.647 | 0.09 | 0.170 | 2.111 | 0.988 | 중간모난 ~ 모난 | 석영 | SP |

표 2. 시험모래의 구성성분 (XRF)

| 성분 | $Al_2O_3$ | CaO | $Fe_2O_3$ | $K_2O$ | MgO | MnO | $Na_2O$ | $P_2O_5$ | $SiO_2$ | $TiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 함유율 (%) | 0.68 | 0.10 | 0.50 | 0.17 | 0.07 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 98.47 | 0.05 |

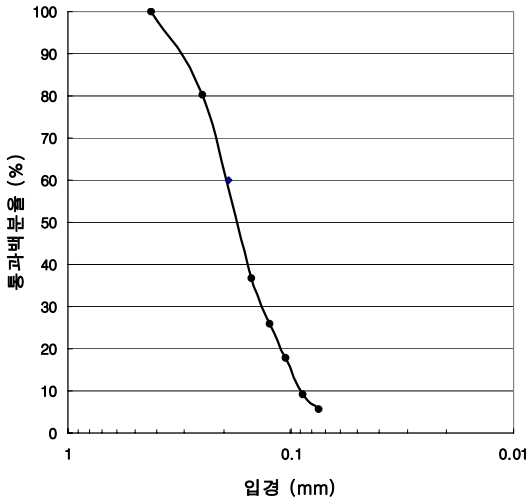



그림 1. 시험모래의 입도분포

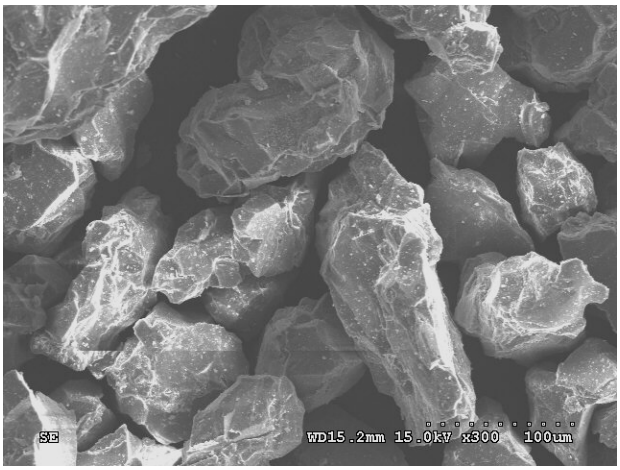



그림 2. K-7호사 SEM 사진 [300배율]

## 3. 시험방법

### 3.1 플루베이션 장치 및 시험방법

플루베이션 시험법은 Miura와 Toki(1982)에 의해 제안된 MSP법이 일반적으로 사용되는데, 본래의 목적은 균질한 상대밀도의 사질토 시료를 조성하기 위해 개발되었다. 플루베이션 시험법은 오차범위가 작고 세립분이 적은 모래의 실험 시 균질한 시료를 조성할 수 있으며 반복시험이 용이하고 경제적인 방법이다(Presti 1992). Miura와 Toki(1982)에 의해 개발된 플루베이션 장치(MSP방법)는 그림 3과 같이 자유낙하 시킬 사질토를 저장하는 상부 저장몰드, 저장몰드 하부에 설치되어 사질토가 일정한 양으로

낙하 하도록 조절하는 개폐노즐(opening nozzle), 시료가 분산되어 서로간의 낙하속도를 저하시키지 않고 몰드에 균질하게 낙하되도록 수개의 체로 구성된 분산체(multiple sieve), 그리고 마지막으로 낙하된 사질토가 채워질 몰드로 이루어져 있다. 그림 4는 본 연구에서 사용된 플루베이션 시험기로 Miura와 Toki(1982)의 MSP를 기본으로 하여 제작되었다.

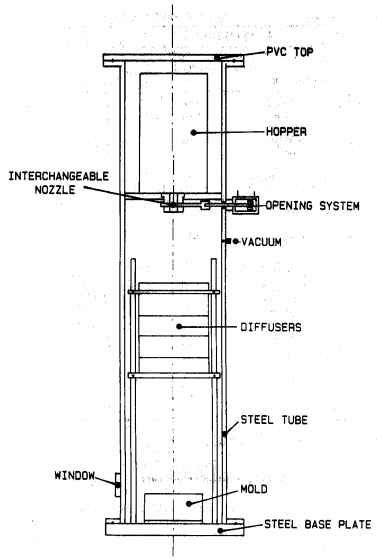



그림 3. Multiple Sieve Pluviation Tester (Miura와 Toki, 1982)

그림 4. 플루베이션 시험기 (Korea Univ)

Rad와 Tumay(1987), 최성근 등(2007)은 플루베이션 시험법은 개폐율, 낙하거리, 낙하높이 등 여러 가지 요인에 의해 지배되며 그 중 개폐율은 결과값에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나라고 하였다. Rad와 Tumay(1987)는 낙하속도가 일정해지는 종단낙하고 이상에서는 낙하고에 관계없이 동일한 상대밀도의 시료를 조성할 수 있다고 하였다. Vaid와 Neguessy(1984)는 플루베이션을 통해 낙하하는 사질토를 독립적인 구체로 모델링하여 일정높이 이상에서는 낙하속도가 일정하였고 그때 조성되는 시료의 간극비도 일정하다고 하였다. 즉, 사질토에 대한 낙하시험을 노즐의 개폐구멍 크기와 낙하고의 조절을 통해 상대밀도가 최대가 되는 낙하조건을 찾을 수 있으며, 그 때의 건조단위중량($\gamma_d$)을 최대건조단위중량($\gamma_{dmax}$)으로 볼 수 있고 이 값으로부터 최소 간극비를 산정할 수 있다. K-7호사의 경우 낙하고가 1m 이상일 때 모래입자는 종단속도에 도달하기 때문에 본 연구에서는 낙하고를 1m로 고정하여 낙하고에 의한 영향을 배제하였다. 또한, 실험결과에 영향을 미치는 다른 실험조건들은 표3과 같이 단일 조건으로 고정하여 실험결과에 영향을 미치지 않도록 하였다.

표 3. 플루베이션 시험조건

| 낙하고 | 분산체 조합 | 분산체 크기 | 개폐율 |
|---|---|---|---|
| 100cm | 3개 | #8 (1개)<br>#4 (2개) | 0.25% |

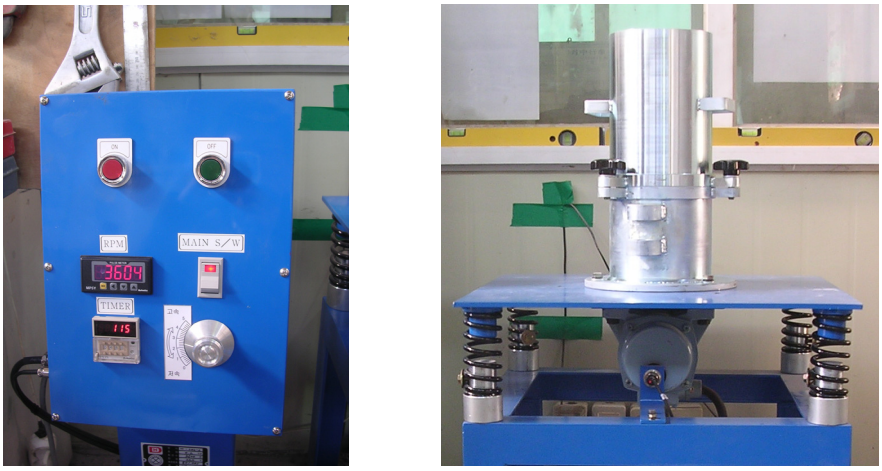
본 연구에서는 상부 저장 몰드에 모래를 채우고 몰드하부의 중앙에 개폐율 0.25%의 노즐을 설치하였다. 분산체는 상부에 8번체, 중간과 하부에는 4번체를 서로 45°로 교차되도록 설치하여 낙하 시 입자간 간섭효과를 제거하여 모래 입자가 효과적으로 분산되도록 하였다. 분산체와 하부몰드와의 거리를 모래입자의 낙하속도의 영향을 배제할 수 있는 종단낙하고 1m로 조정하였다. 하부몰드는 모래의 낙하 시 분산되는 범위를 고려하여 직경 7cm, 높이 16.1cm의 플라스틱 몰드를 사용하였다. 개폐장치를 이용하여 모래

를 낙하시켜 하부 몰드에 모래를 채운 후 몰드 상부에 쌓인 모래는 조심스럽게 제거하여 무게를 측정하여 최소 간극비를 산정하였다.

### 3.2 진동대 시험장치 및 시험방법

진동대 시험은 한국공업규격(KS F 2345)의 규정을 따라서 실험하였으며, 60Hz의 진동수로 8분간 진동하되 진동대의 진폭은 KS F 2345의 기준인 0.15mm~0.33mm 범위를 만족해야 한다. 본 연구에서 사용한 진동대(그림 5)는 진동수와 시험시간을 조절할 수 있는 콘트롤 판넬을 갖추고 있으며 진폭은 0.31mm로써 표준기준을 만족시킨다.

시험방법은 몰드에 모래를 스쿠프(scoop)를 이용하여 가능한 최대로 느슨하게 채워 시료분리를 최소화 시킨 후 몰드의 옆면을 메달바(metal bar)나 고무망치(rubber hammer)로 타격하여 침하시키는데, 이는 진동 시 몰드내 공기의 급격한 흐름을 방지하고 하중재하판(base plate)을 쉽게 놓기 위함이다. 흙 표면에 하중재하판을 놓고 살짝 여러번 비틀어 흙과 하중재하판과 균일하고 확실하게 고정되도록 한다. 그리고 하중재하판 손잡이(base plate handle)를 제거한다. 몰드를 진동테이블에 고정시키고 두 개의 다이얼 게이지를 이용하여 각 게이지 별로 6번씩 위치를 바꿔 측정하여 총 12곳의 값을 평균하여 초기값( $R_i$)을 측정하고 측정된 값의 평균은 0.025mm이하의 오차를 가지도록 한다. 가이드 슬리브(guide sleeve)를 몰드에 부착하고 하중추(surcharge weight)를 하중재하판 위에 놓은 후 60Hz의 진동수로 8분간 진동시킨다. 시험이 끝난 후 하중추와 가이드 슬리브를 제거하고 두 개의 다이얼 게이지를 이용하여 12곳의 값을 측정($R_f$)하여 평균한다. 진동대로부터 몰드를 제거하고 몰드로부터 base plate를 제거한 후 몰드와 흙의 무게를 측정한다. 몰드를 비우고 몰드 무게를 측정하고 몰드 지름, 높이를 측정하여 몰드 부피를 계산한다.




(a) 콘트롤 판넬 (b)시험몰드

그림 5. 진동대 시험기

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 최소 간극비 산정결과

플루베이션 시험 시 결과값에 영향을 줄 수 있는 낙하고, 개폐율, 분산체의 크기 및 조합을 고려하여 실험한 결과, 낙하고는 100cm로 고정하고 분산체 3개를 4번체 2개와 8번체 1개로 조합하여 개폐율을 0.25%로 실험했을 때 가장 작은 최소 간극비를 획득할 수 있었고 평균 0.666인 것으로 분석되었다.(표4)

표 4. 플루베이션과 진동대를 이용한 최소 간극비 산정결과

| 구분 | 플루베이션 | | 진동대 | |
|---|---|---|---|---|
| | 최소간극비 | 시험 후 세립분 (#200 통과량) | 최소간극비 | 시험 후 세립분 (#200 통과량) |
| 평균값 | 0.666 | 3.0% | 0.584 | 4.35% |

진동대 시험을 통해 산정된 최소 간극비는 평균 0.584로 나타났다(표4). 수세법을 이용하여 실험 전 K-7사의 세립분을 측정한 결과 평균 3%정도로 나타났으며, 진동대 시험 후 진동대 몰드 상중하 세곳에서 500g씩 채취하여 수세를 실시한 결과 1~2%정도 세립분이 증가하는 것으로 나타났다.

그림 6, 7에서 보는바와 같이 플루베이션 시험법과 진동대 시험법을 이용하여 획득한 최소 간극비는 대체로 일정한 값을 보이고 있어 두 시험법 모두 시험상의 오차가 적고 시험의 반복성에서 신뢰성이 높은 시험임을 확인할 수 있었다. Presti(1992)는 플루베이션 결과가 진동대 결과보다 일반적으로 더 작은 최소 간극비를 산정할 수 있다고 하였으나 위의 결과에서는 진동대로 산정한 최소 간극비가 플루베이션으로 산정한 최소 간극비 보다 0.06정도 작은 것으로 나타났다. 인공사의 경우 자연사보다 미세균열을 많이 내포하고 있기 때문에 진동대 시험 시 입자파쇄의 가능성이 있어 이를 입도분포 분석시험으로 확인하고자 하였다.

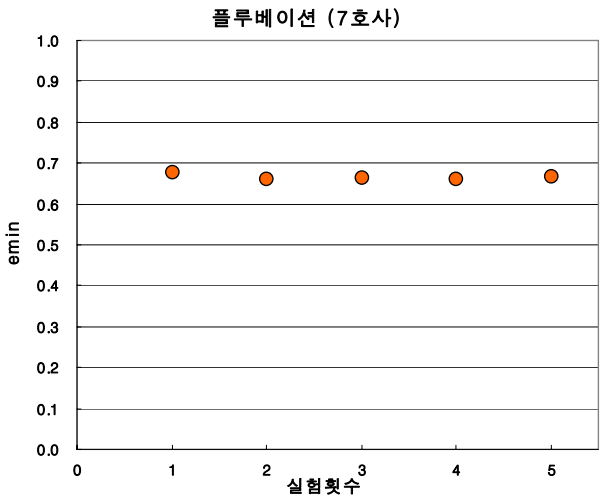



그림 6. 플루베이션 실험결과

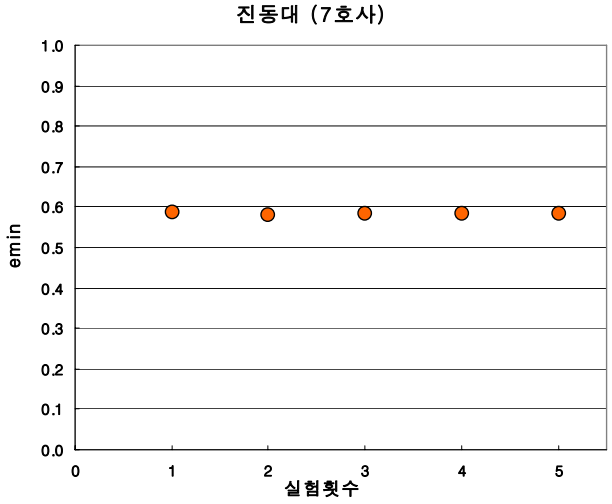



그림 7. 진동대 실험결과

## 4.2 입자파쇄여부 분석결과

최소 간극비 산정결과 진동대 시험과 플루베이션 시험값의 차이가 발생하는 것으로 나타났으며, 진동대 시험 시 입자파쇄 발생 가능성을 입도분포 분석을 통해 확인해 보았다. 세립분의 영향을 배제하고 실험 후 세립분의 증가량을 정확히 측정하기 위해 수세법을 이용하여 시험 전 시료의 세립분을 모두 제거하였다. 그 결과 그림 8에서 보는 바와 같이 실험 후의 세립분은 약 2%정도 증가하였고, 80~200번체 사이의 입경에서 파쇄가 발생한 것을 확인할 수 있다. 실험 전 80번체(0.18mm)의 통과백분율이 55% 정도였지만 실험 후에는 80번체의 통과백분율이 약 70%인 것으로 나타나 80번체에 있던 큰 입자들이 진동대 시험과정에서 파쇄되어 통과백분율이 약 15% 정도 늘어난 것을 확인할 수 있었다. 또한 100체(0.15mm) 이하의 입자들도 1~3% 가량 증가한 것으로 분석되었다. 이렇게 증가된 세립분은 공극을 메우는 작용을 하여, 진동대 시험법을 이용하여 산정한 최소간극비가 플루베이션을 이용한 것보다

더 밀하게 다져진 효과가 발생한 것으로 판단된다. 이는 파쇄가 일어나면 진동대의 결과값이 플루베이션의 결과값 보다 작다는 Presti(1992)의 연구결과와 일치한다.

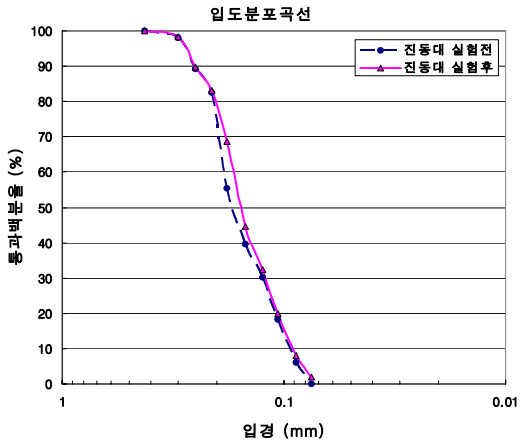



그림 8. 진동대 실험 전후의 입도분포곡선

## 5. 결 론

본 연구에서는 진동대와 플루베이션 시험법을 이용하여 최소 간극비를 산정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 반복실험결과 진동대와 플루베이션 시험법 모두 일정한 최소 간극비 값을 보여 각 시험법의 신뢰성이 확보되는 것으로 나타났다.
2. 두 가지 시험법으로 산정한 최소 간극비는 다르게 나타났으며, 특히 진동대 시험 후 시료에 대해 입도분포 분석을 실시한 결과 세립분의 증가와 함께 K-7호사의 중간크기 모래입자에서 파쇄가 일어난 것을 확인하였다.
3. 모암을 파쇄시킨 인공모래의 최소 간극비를 결정할 경우 입자파쇄에 대한 영향을 고려해야 하며, 한국공업규격(KS F 2345) 규정을 그대로 적용할 경우 흙의 파쇄가 발생하므로 플루베이션 시험법을 적용하는 것이 올바르다.

## 참 고 문 헌


1. 최성근, 이문주, 추현욱, 홍성진, 이우진(2007) “Porous Plate를 이용한 개선된 레이닝 시스템”, **한국지반공학회논문집**, 제23권 6호, pp.67-76.
2. 한국공업규격 (2004), "KS F 2345, 비점성토의 상대밀도 시험방법".
3. ASTM(1983) "D 4253-83, Standard Test method for MAXIMUM INDEX DENSITY OF SOILS USING A VIBRATING TABLE”.
4. Diego C. F. Lo Presti(1992) “Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83: A comparative study”, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 15, No. 2, pp.180~189.
5. Miura, S. and Toki, S.(1982) “A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand”, *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 1, pp.61~77
6. Rad, N. S. and Tumay, M. T.(1987) “Factors affecting sand specimen preparation by raining”, *Geotechnical Testing Journal,* GTJODJ, Vol. 10, No. 1, pp.31~37.
7. Vaid, Y. P. and Negussey, D.(1984) “Relative density of pluviated sand samples”, *Soils and Foundations*, Vol. 24, No. 2, pp.101~105.