

## 인공모래에 대한 진동대 시험시 입자파쇄 현상 확인

### Confirmation of particle crushing on the vibrating table test of artificial sand

조용순<sup>1)</sup>, Yong-Soon Cho, 김래현<sup>2)</sup>, Raehyun Kim, 김재정<sup>3)</sup>, Jae-Jung Kim, 이우진<sup>4)</sup>, Woojin Lee

<sup>1)</sup> 두산건설주식회사, Staff, Doosan Engineering and Construction

<sup>2)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정, Ph. D. Student, School. of Civil, and Architectural Engineering, Korea Univ

<sup>3)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, School. of Civil, and Architectural Engineering, Korea Univ

<sup>4)</sup> 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수, Associate Professor, School. of Civil, and Architectural Engineering, Korea Univ

**SYNOPSIS :** The vibrating table method is widely used to estimate the minimum void ratio  $e_{min}$ . The existing method recommended in ASTM and KS F, however, can not consider the particle crushing during the vibrating table test. In this study, the particle crushing phenomenon was investigated by comparing vibrating table test with pluviation method using artificial sand (K-7). Vibrating table test for the artificial sand was confirmed which can crush of particle during the test. This study demonstrates that vibrating table test is an ineffective method to produce the more reliable  $e_{min}$  of artificial sand.

**Keywords :** Artificial sand, Minimum void ratio, Pluviation test, Relative density, Vibrating table test

## 1. 서론

흙의 상대밀도는 일반적으로 사질토의 느슨하고 밀한 상태를 말하는데, 압축성이 낮은 사질토의 특성상 초기에 조성되어 있는 상대밀도가 압축 및 전단거동의 중요한 영향인자로 작용한다. 상대밀도를 정확하게 측정하고 조성하기 위해서는 대상 사질토가 가질 수 있는 최대·최소 간극비를 측정해야 하며 상대밀도에 영향을 미치는 입도분포, 세립분 함량, 입자 모양 및 함유된 광물 등을 고려하여야 한다.

상대밀도를 산정하는 최소간극비 시험법 중 가장 많이 사용하는 플루베이션 방법과 진동대 시험법은 여러 연구자에 의해 많은 연구가 이루어졌지만 각각의 연구자들이 제시한 방법과 그 시험 결과값은 차이를 보인다(Kolbuszewski 1948a, b; Miura 와 Toki 1982; Vaid 와 Negussey 1984, 1988; Arrigoni 1986; Rad 와 Tumay 1987; Pallara 1988; Barton와 Palmer 1989; Lo Presti 등 1992). 특히, 자연 모래의 고갈로 최근에는 인공 파쇄 모래에 대한 관심이 증대되고 있으나 인공모래에 대한 진동대 시험법은 시험 결과 입자파쇄가 발생하여 최대건조중량에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Rosi 1983; Peisino 1987; Poet Aglietto 1989). 인공모래는 모암을 인위적으로 파쇄하여 만들었기 때문에 자연 모래에 비해 강도가 낮고 빈입도 분포를 보이며, 여러 단계의 파쇄 과정에서 발생한 미세 크랙이 존재하며 자연 규사의 특성을 거의 갖고 있지 않다.

일반적으로 미국재료시험협회(ASTM D 4253-00, 2006)와 한국공업규격(KS F 2345, 2004)에서 규정하고 있는 진동대 시험법이 널리 사용되고 있으나 두 시험법 모두 자연모래를 기준으로 제시된 시험법이므로 인공모래에 대해 적용할 경우 모래입자가 파쇄되어, 시험전후 #200 통과량이 증가하여 본래의 입도

분포가 아닌 전혀 다른 모래의 입도구성을 가지게 된다(Rossi 1983).

본 연구에서는 인공모래인 K-7에 대해 최소간극비 산정에 이용되는 대표적인 시험법인 진동대 시험법(ASTM D 4253-00, 2006; KS F 2345, 2004)과 플루베이션 방법(Miura와 Toki 1982)을 적용하여 시험법의 차이가 최소간극비 결정에 미치는 영향과 진동대시험법 적용시 시험도중 인공모래의 입자가 파쇄되는 현상을 확인하였다.

## 2. 시험시료 특성

본 연구에서는 인공모래에 대한 진동대 시험법과 플루베이션 시험법을 비교하기 위해 인공모래(K-7)를 사용하였으며, 자연모래에 있어서의 입자파쇄 영향 정도를 평가하기 위해 국내 표준사인 주문진사를 사용하였다.

인공모래의 기본 물성은 표 1과 같다. 인공모래(K-7)의 비중은 2.647, 평균입경( $D_{50}$ )은 0.17mm이며 그림 1에서 보는 바와 같이 인공모래는 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_c$ )가 작은 빈입도 분포를 나타내고 있으며, 통일분류법상 SP에 해당된다. 또한 인공모래는 모암인 규석으로부터 인위적인 파쇄과정을 거쳐 일정한 입경의 모래로 가공된 것으로 자연모래와 달리 풍화과정이 없기 때문에 그림 2에서 보는 바와 같이 중간모난~모난 정도의 대체로 거친 조도(roundness) 분포를 나타낸다. 표 2는 X-선 형광분석기(XRF)를 통해 인공모래와 자연모래의 광물특성을 분석한 결과로써 실험에 사용할 인공모래는  $SiO_2$ 가 98% 이상을 차지하는 석영질 모래로 나타나 일반적인 석영질 자연모래의 광물학적 특성과 유사한 것으로 분석되었다.

자연모래이면서 국내 표준사인 주문진사는 평균입경이 0.52mm로 실험에 사용된 인공모래보다는 큰 입경을 가지나 입도분포곡선의 형태는 인공모래와 유사한 빈입도 분포(그림 1)를 가지는 것으로 나타났다. 통일분류법상 SP에 해당되나 풍화작용을 받은 자연모래이므로 중간모난~중간둥근 정도의 조도(그림 2)를 가지고 있다.

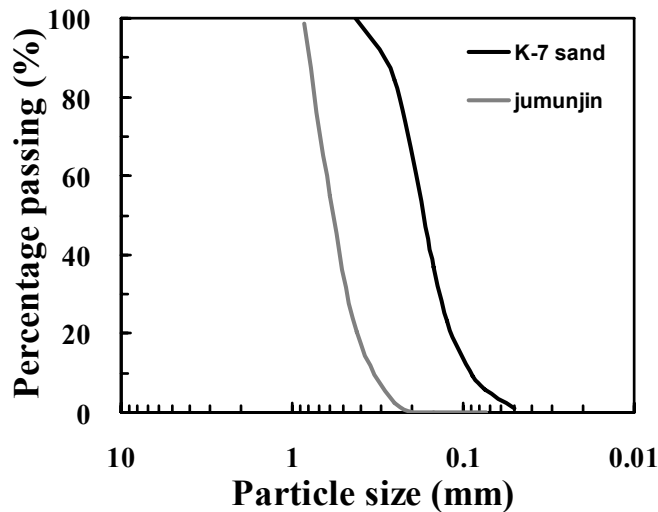
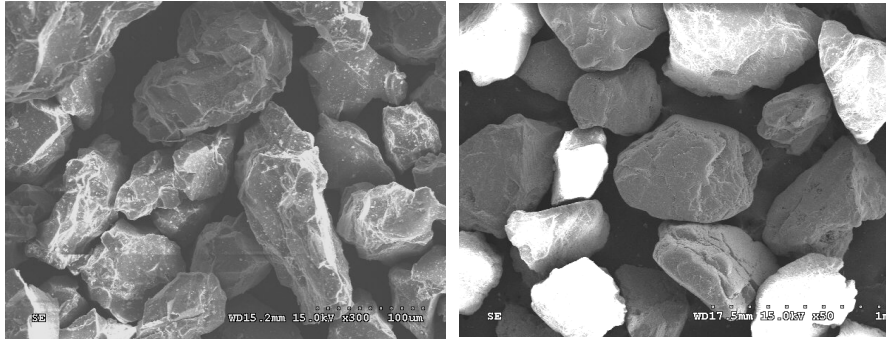


그림 1. 모래입도분포곡선

표 1. 실험모래 기본물성

구분	Gs	$D_{10}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	Cc	Cu	조도	emax	광물특성	USCS
K-7	2.647	0.09	0.17	0.988	2.111	중간모난~모난	1.074	quartz	SP
주문진사	2.632	0.395	0.52	1.045	1.462	중간모난~중간둥근	0.977	quartz	SP



(a) K-7

(b) 주문진사

그림 2. 모래시료 SEM 사진

표 2. 실험모래 구성성분(함유율, %)

구분	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
K-7	0.68	0.10	0.50	0.17	0.07	0.01	0.01	0.01	98.47	0.05
주문진사	5.47	0.12	0.15	3.58	0.04	n.d	0.54	0.01	86.04	0.04

### 3. 최소간극비 결정법 및 시험방법

#### 3.1 최소간극비 결정법

상대밀도를 평가하기 위한 최소간극비 산정법은 많은 연구자들에 의해 연구가 이루어졌으며, 각 나라마다 각기 다른 기준시험법을 채택하고 있다(표 3). 일본의 표준시험법(JGS 161, 2000)은 나무 해머를 사용하여 몰드를 타격하는 방법을 사용하며, 독일의 표준시험법(DIN 18126, 1996)은 진동테이블과 탭핑 몰드 두가지 방법을 사용하지만 미국재료시험협회(ASTM)의 진동대 시험법과는 다른 방식을 채택하고 있다. 또한 영국의 표준시험법(BS 1377, 1990)은 진동식 해머를 사용하도록 규정되어 있다. 국제 기준으로 채택되어 있지는 않으나 연구분야에서 널리 활용되고 있는 방법으로 Miura와 Toki (1992)가 제안한 플루베이션 방법 (pluviation method)가 있다.

Pallara(1988)와 Barton와 Palmer(1989)는 플루베이션 시험 시에는 입자파쇄현상이 나타나지 않는다고 하였다. 그러나 진동대 시험을 이용한 최소간극비 산정시 입자파쇄가 발생하여 최대건조단위중량 값에 영향을 미치는 것으로 나타났다 (Rossi 1983; Peisino 1987; Poet Aglietto 1989). Lo Presti 등(1992)의 연구결과에 의하면 입자파쇄가 발생하지 않을 경우 통상 플루베이션 시험법으로 산정한 최대건조단위중량( $r_{dmax}$ )이 진동대로 실험한 최대건조단위중량보다 큰 값을 보이며 시험의 반복성이나 경제성 측면에서도 플루베이션 시험법이 유리한 측면이 있으나, 현재 국내외 시험규준에서는 진동대 시험법이 적용되고 있어 입자파쇄가 발생하는 인공모래에 대한 수정방안이 요구되고 있다.

표 3. 각 나라별 최소간극비 시험법

Nations	Standard	Testing method
Korea	KS F 2345	vibrating table
U.S.A	ASTM D 4253	vibrating table
Germany	DIN 18126	vibrating table tapping mold
England	BS 1377 part4	vibrating hammer
Japan	JGS T 161	tapping mold

### 3.2 시험장치 및 방법

플루베이션 시험법은 Miura와 Toki(1982)에 의해 개발된 방법으로 초기 개발목적은 균질한 삼축시료를 조성하기 위한 것이었다. 플루베이션 시험법은 사질토를 일정높이에서 자유낙사 시켜 조성된 시료를 이용하여 최대건조단위중량( $r_{dmax}$ )을 산정하는 방법으로 플루베이션 시험장치의 기본 구성형태는 그림 3(a)와 같다. 장치의 상부에 낙사 시킬 사질토를 저장하는 저장 몰드가 있으며 몰드 하단에는 시간당 일정한 양의 사질토가 낙하되도록 조절하는 개폐노즐(nozzle)이 위치하고 있다. 그 아래에는 시료를 충분히 분산시켜 낙하하는 동안 입자간 간섭이 발생되지 않도록 2개 이상의 체(sieve)가 엇갈린 방향으로 설치되어 있어 낙하된 사질토가 바닥의 몰드에 균등하게 채워지도록 구성되어 있다.

플루베이션 시험법을 통해 산정된 사질토의 상대밀도는 노즐의 개폐율과 시료의 낙하고에 영향을 받으며 개폐구멍의 크기는 작고 낙하고는 높을수록 상대밀도는 증가한다 (Miura와 Toki 1982). 즉, 사질토의 입경별로 노즐의 개폐율과 낙하높이를 변화시켜가며 반복시험을 실시한 후 상대밀도가 최대가 되는 낙하조건에서 획득된 건조단위중량을 최대건조단위중량으로 채택하게 된다. 플루베이션 시험법은 시행착오라는 반복적 과정이 요구되나 비교적 반복시험에 대한 오차가 작고 시험방법이 간단한 장점이 있다.

진동대 시험법은 상하로 진동하는 진동테이블에 몰드를 설치하고 충분한 사질토를 채운 후 몰드 상부에 설치된 하중추를 진동수 3600rpm에서 8분간 진동시켜 최대 건조단위중량을 산정하는 방법이다 (ASTM D 4253-00, 2006; KS F 2345). 진동대 시험순서는 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 우선 스킵(scoop)을 이용하여 시료분리가 최소화되도록 시료를 몰드의 표면까지 채운다. 그리고 베이스 플레이트(base plate)를 위치시키기 위해 고무망치를 이용하여 몰드의 옆면을 때려 흠을 침하시킨다. 베이스 플레이트를 시료 위에 위치 시킨후 베이스 플레이트를 여러번 비틀어 시료가 베이스 플레이트와 균등하게 접하도록 한다. 몰드를 진동테이블에 부착시킨 후 두 개의 게이지를 이용하여 각각 6곳의 시료의 초기 높이( $R_i$ )를 측정한다. 가이드 슬리브(guide sleeve)를 고정시키고 진동추를 설치한 후 실험을 실시한다. 게이지를 이용하여 실험후 시료의 높이( $R_f$ )를 측정한다. 몰드와 시료의 무게를 측정하고, 베이스 플레이트의 높이와 몰드의 부피를 측정하여 최소간극비를 산정한다.

진동대 시험 시 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나인 진동 폭은 표준시험법에 제시된 8mm이내를 만족하여야 하므로 본 연구에서는 그림 4와 같이 진동테이블의 상하좌우 4곳에 가속도계를 설치하고 오실로스코프를 이용하여 주파수와 가속도를 측정하였다. 진폭을 계산한 결과 상하좌우 4곳 모두 평균 0.31mm의 진폭을 나타내어 규정된 진폭의 크기를 만족하는 것으로 나타났다.

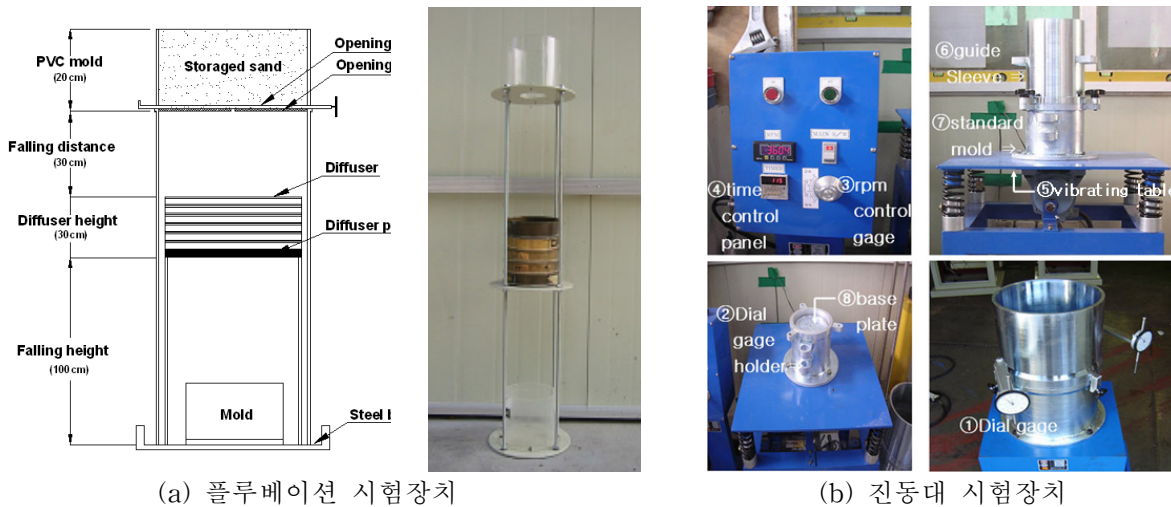


그림 3. 시험장치 구성사진



그림 4. 오실로스코프를 이용한 진동대의 진폭측정

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 시험법에 따른 최소간극비 변화

시험방법의 차이가 최소간극비에 미치는 영향을 분석하기 위해 자연모래인 주문진사와 인공모래인 K-7을 이용하여 플루베이션 방법과 진동대 시험법으로 최소간극비와 최대 건조단위중량을 산정하였다. 각 시료당 5회의 반복시험을 통하여 시험결과의 신뢰성 확보하였고 그 평균값을 도출하였다. 표 4에 보는 바와 같이 두 시험법에서 획득된 최소간극비는 자연모래인 경우와 인공모래인 경우 서로 다른 경향을 보이고 있다. 자연모래인 주문진사는 진동대 시험법보다 플루베이션 시험법을 적용할 경우 약 3.8% 가량 더 낮은 최소간극비가 획득되었으나, 인공모래인 K-7은 진동대로 시험한 결과가 10%이상 최소간극비가 더 낮은 것으로 나타나 훨씬 밀한 상태의 시료가 조성되는 것으로 분석되었고 인공모래에 대해 각기 다른 시험법을 적용할 때 최소간극비의 변화가 심한 것으로 나타났다.

또한 그림 5에서 보는 바와 같이 플루베이션 방법으로 획득한 자연모래의 최대 건조단위중량이 진동대 시험법으로 산정한 최대 건조단위중량 보다 커 입자파쇄가 발생하지 않을 경우 플루베이션 시험법으로 산정한 최대 건조단위중량이 진동대 시험결과보다 큰 값을 가진다는 Lo Presti 등 (1992)의 연구결과와 일치하고 있다. 그러나 인공모래의 경우 진동대로 시험한 최대 건조단위중량이 플루베이션 결과보다 훨씬 큰 것으로 나타나 진동대 시험법으로 조성한 모래시료가 보다 밀하게 조성되었음을 알 수 있다.

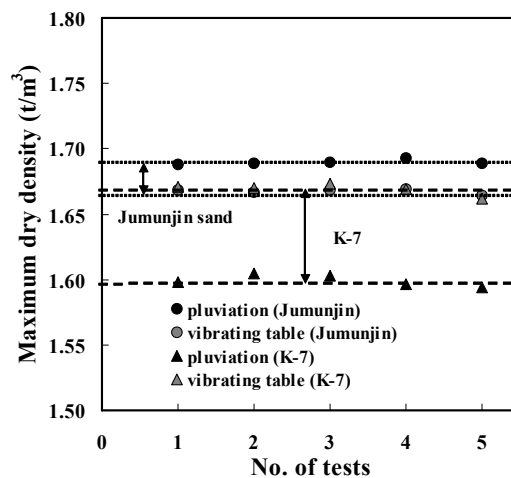


그림 5. 플루베이션과 진동대 시험에 따른 최대건조단위중량 비교 (주문진사, K-7)

표 4. 플루베이션과 진동대 시험에 따른 최소간극비 비교 (주문진사, K-7)

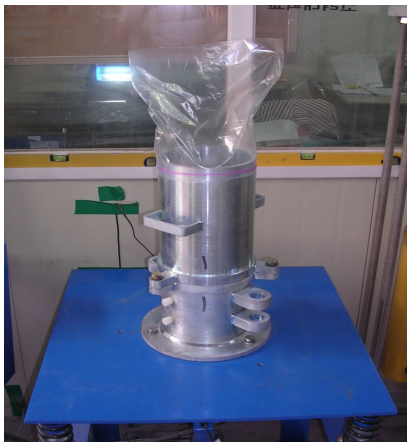
구분	최소간극비 ( $e_{min}$ )		증감
	플루베이션	진동대	
주문진	0.558	0.579	3.8% ↑
K-7	0.653	0.586	10.2% ↓

## 4.2 진동대 시험 시 입자파쇄 현상

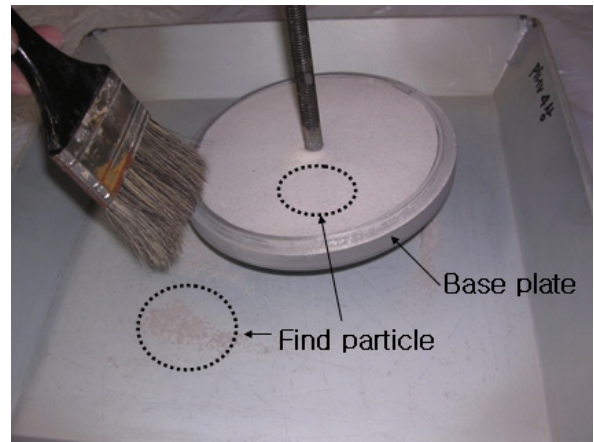
### 4.2.1 시험 전후 세립분 변화 측정

인공모래인 K-7의 시험법에 따른 최소간극비의 오차가 크게 발생하는 원인을 분석하기 위해 시험 전후의 세립분 변화를 측정하였다. 자연모래에 비해 상대적으로 모난 정도가 심하며 많은 미세크랙을 내포하고 있는 인공모래는 진동대 시험시 입자의 파쇄가 발생되어 흙입자의 공극을 메워 최소간극비를 감소시킬 수 있기 때문에 200번체 통과량을 비교하여 입자파쇄 발생여부를 분석해 보았다.

시험 전 시료 속에 포함된 200번체 통과 세립분은 수세법을 이용하여 모두 제거하여 200번체 통과량이 0%인 상태로 진동대 시험을 실시하였다. 진동대 시험과정에서 분진형태로 외부로 날아가는 세립분을 포집하기 위해 그림 6(a)와 같이 상부에 비닐커버를 씌웠으며, 그림 6(b)의 베이스 플레이트에 쌓이는 세립분까지 고려하여 시험 후 발생한 세립분의 양을 측정하였다. 그 결과, 표 5에서 보는 바와 같이 진동대 시험 후 입자파쇄로 인해 발생한 세립분은 1.218~1.913%이며, 분진의 형태로 발생한 양은 0.038~0.043%인 것으로 나타났다. 즉, 진동대 시험시 발생하는 인공모래의 200번체 통과 세립분의 증가량은 미비하여 최소간극비 변화에 미치는 영향도 크지 않은 것으로 분석되었다.



(a)분진되는 세립분 포집을 위한 비닐커버



(b)진동대시험 종료후 상부캡 위에 쌓인 세립분

그림 6. 분진형태로 손실되는 세립분 양의 측정

표 5. 진동대 시험으로 발생하는 세립분 양의 측정결과

구분	시험 전 세립분 함량	시험후 세립분 함량	
		몰드속 시료에 포함된 세립분	분진형태의 세립분
시험 1	0%	1.913%	0.043% (1.42g)
시험 2	0%	1.218%	0.038% (1.27g)

#### 4.2.2 시험 전후의 입도분포곡선 비교

진동대 시험시 분진형태로 발생된 200번체 통과 세립분의 양은 미미한 것으로 나타났으며 최소간극비에 미치는 영향이 작은 것으로 나타났다. 따라서 입자 파쇄가 최소간극비에 영향을 준다는 기존의 연구 결과를 바탕으로 시험 전후의 입도분포곡선 비교를 통해 중간크기 입자의 파쇄 여부를 분석하였다. 즉, 진동대 시험 전후의 입도분포를 비교하여 시험 전후에 인공모래인 K-7의 전체적인 입도분포가 어떻게 변하는지 비교 분석하여 보았다.

시험 전 시료를 수세법을 이용하여 200번체 통과 세립분을 0%로 만든 인공모래 K-7을 이용하였으며 시험 후 입도분석은 건조법과 수세법 두가지에 대해 각각 실시하였다. 그림 7은 진동대 시험 전후의 입도분포곡선 변화를 나타낸 것으로 시험 후 중간 크기의 입자가 최대 9%정도 증가한 것으로 나타났다. 이는 큰 입자가 파쇄되어 중간 크기의 입자로 분할되었기 때문이며 70번체(0.21mm)에서는 5%, 80번체(0.18mm)에서는 9%, 100번체(0.15mm)에서는 5%의 통과량 증가현상이 확인되었다. 따라서 진동대 시험시 발생하는 입자 파쇄현상은 세립자의 증분보다는 중간크기(0.15~0.21mm)의 입자의 증가로 나타났으며 이렇게 증가된 중간 크기 입자는 최소간극비에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 입도분포 분석시 건조법과 수세법의 차이가 거의 나타나지 않아 세립분의 증분이 매우 미미하였음을 유추할 수 있으며, 체분석 방법의 방법적 차이는 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

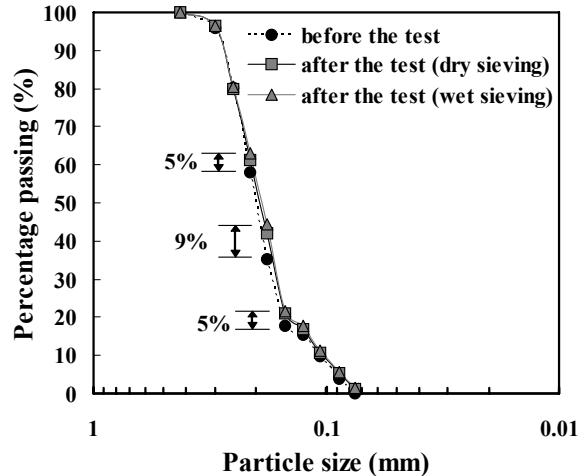


그림 7. 진동대 시험 전후의 입도분포곡선 비교 (인공모래, K-7)

### 5. 결론

인공모래에 대해 진동대 시험법과 플루베이션 시험법을 적용하여 수행한 시험 결과는 다음과 같다.

1. 인공모래인 K-7과 자연모래인 주문진사에 대해 진동대 시험법과 플루베이션 시험법을 적용시 자연모래인 주문진사는 시험법에 상관없이 비슷한 최소간극비를 획득하였지만, 인공모래인 K-7의 경우 진동대 시험법과 플루베이션 방법으로 획득한 최소간극비는 10%이상 차이가 발생하는 것으로 나타났다.
2. 진동대 시험 후 입자파쇄로 인해 발생된 세립분은 1.218~1.913%이며, 분진의 형태로 발생한 양은 0.038~0.043%인 것으로 나타나 진동대 시험시 발생하는 인공모래의 200번체 통과 세립분의 증가량은 미비하여 최소간극비 변화에 미치는 영향도 크지 않은 것으로 분석된다.
3. 인공모래인 K-7에 대해 진동대 시험 전후 입도분포곡선을 비교해본 결과 중간크기(0.15~0.21mm)에서 주로 파쇄가 발생하여 최소간극비에 영향을 주는 것으로 나타나 진동대 시험법을 인공모래에 적용시 입자파쇄에 영향을 주지 않는 수정된 진동대 시험법이 필요한 것으로 분석된다.



## 참고문헌

1. ASTM (2006), *ASTM D 4253-00 Standard Test method for MAXIMUM INDEX DENSITY OF SOILS USING A VIBRATING TABLE*, ASTM, West Conshohocken.
2. Barton, M. E., Palmer, S. N. (1989), "The relative density of geologically aged, British fine and fine-medium sands", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol.22, pp.49-58.
3. British Standards (1990), *BS 1377 Maximum density*, London.
4. Deutsches Institut Fur Normung E. V. (1996), *DIN 18126 Determination of minimum and maximum dry densities of non-cohesive soil*, Berlin.
5. Lo Presti, C. F., Pedronis, and Crippav (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.
6. Japanese Geotechnical Society (2000), *Test methods for minimum and maximum densities of sands*, Soil testing standards, Tokyo, pp136-138.
7. Kolbuszewski, J. J., (1948), "An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands", *Proceedings of the second international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Vol.1, pp.158-165.
8. Kolbuszewski, J. J., (1948). "General investigation of the fundamental factors controlling loose packing of sand", *Proceedings of the second international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Vol.1, pp.47-49.
9. Korea Standard (2004), *KS F 2345 Testing method for relative density of cohesionless soils*, Korea standards association, Seoul.
10. Miura, S., 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
11. Peisino, V. (1987), *Dynamic shear moduli of silty sands*, M. Sc. thesis, Technical university of Turin.
12. Poet Aglietto, M. L. (1989), Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation," M. Sc. thesis, Technical university of Turin.
13. Rad, N. S., Tumay, M. T. (1987), "Factors affecting sand specimen preparation by raining", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.10, No.1, pp.31-37.
14. Rossi, R. (1983), *Minimum and Maximum dry density of granular materials*, M. Sc. thesis, Technical university of Turin.
16. Vaid, Y. P., Negussey, D. (1984), "Relative density of pluviated sand samples", *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp.101-105.
17. Vaid, Y. P., Negussey, D. (1988), "Preparation of Reconstituted sand specimens", *ASTM*, pp.405-417.