

# 포화된 모래지반의 액상화후 과잉간극수압 소산양상

## Dissipation Pattern of Excess Pore Pressure after Liquefaction in Saturated Sand Deposits

하익수\*      박영호\*\*      김명모\*\*\*  
Ha, Ik Soo   Park, Young Ho   Kim, Myoung Mo

---

### ABSTRACT

The purpose of this study is to understand the dissipation pattern of excess pore pressure after liquefaction which governs the post-liquefaction behavior of liquefied sand deposits.

1-g shaking table tests were carried out on 5 different kinds of sands, all of which had high liquefaction potentials. During the tests excess pore pressure at various depths, and surface settlements were measured.

The measured curve of the excess pore pressure dissipation was simulated using the solidification theory, and from the analysis of the velocity of dissipation, the dissipation pattern of excess pore pressure after liquefaction was examined.

The dissipation velocity of excess pore pressure after liquefaction had a linear correlation with the effective grain size ( $D_{10}$ ) divided by the coefficient of uniformity ( $C_u$ ), and the increase in the initial relative density of the ground played a role in shifting this correlation curve toward an increased dissipation velocity. From the correlation, an approximate method was recommended for prediction of the dissipation curve of excess pore pressure after liquefaction in saturated sand deposits.

---

### 1. 서론

액상화된 지역에서 구조물의 피해정도는 액상화후의 지반거동에 크게 영향을 받는다. 이러한 액상화후 지반거동의 파악을 위해서는 액상화후 과잉간극수압 소산양상 파악이 선행되어야 한다. 지진시 과잉간극수압 시간이력의 측정은 지진발생의 불확실성으로 인해 사실상 불가능하다. 따라서 대부분 시험을 통해 인위적으로 액상화를 발생시킨 후 과잉간극수압 시간이력곡선을 모사하여 파

---

\* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

\*\* 정희원 · 현대건설 기술연구소, 수석연구원, 공학박사

\*\*\* 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

잉간극수압 소산양상을 파악하려는 연구가 수행되고 있다.

Florin과 Ivanov(1961)는 충격하중시험과 진동하중시험을 수행하여, 최초로 포화된 모래지반의 액상화후 과잉간극수압의 소산과 침하 현상을 침강이론(solidification theory)으로 설명하였다. 충격하중시험 결과로 나타난 시간에 따른 깊이별 과잉간극수압 분포곡선이 사다리꼴 모양을 보이는 것으로부터 매 순간 견고화된 층(solidified layer)과 액상화된 층 사이에는 경계, 즉 견고층전면(solidification front)이 존재함을 보였다. 충격하중시험과는 달리 진동하중시험의 경우에는 진동지속시간이 커지면 바닥면에서의 과잉간극수압이 미리 소산되어 소산시점을 잡기가 어렵기 때문에 침강이론을 적용하기는 어렵다고 하였다.

Scott(1986)은 원심모형시험결과 나타난 액상화후 과잉간극수압소산곡선을 침강과 압밀의 복합이론으로 모사하였다. 모래지반도 자중에 의한 압축성을 가지므로 견고층의 축적동안이나 이후에 시간에 따라 축적된 견고층에는 압밀현상이 일어나기 때문에 견고화 과정에서 예상되는 과잉간극수압의 소산은 지체현상이 발생한다고 하였다. 그래서 과잉간극수압의 소산과정을 침강과 압밀, 두 단계로 구분하여 과잉간극수압 소산곡선을 모사하였다. 그리고 침강단계에서의 소산시점은 바닥면에서의 과잉간극수압 소산시점으로 잡았고 깊이별 과잉간극수압 소산시점을 연결한 직선의 기울기로부터 견고층전면의 이동속도를 결정하였다.

이러한 기존의 소산곡선 모사에 관한 연구들은 특정시료에 대한 소산현상 모사에 초점을 두고 있어서 포화된 모래지반의 일반적인 액상화후 과잉간극수압 소산양상 파악이나 소산곡선 예측에 대한 연구성과는 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서는 액상화가능성이 큰, 상이한 입도특성(유효입경=0.11~0.40mm,균등계수=1.53~2.57)을 갖는 5종류의 시험모래에 대해 1-g 진동대시험을 수행하여 깊이별 시간에 따른 과잉간극수압과 지표면침하량을 계속하여 그 결과를 분석하였다. 그 결과로서 계측된, 액상화후 과잉간극수압 소산곡선을 침강이론을 이용하여 모사하고 선형적으로 모사한 소산곡선의 기울기를 가지고 액상화후 과잉간극수압 소산양상을 파악하고 소산곡선의 근사예측법을 제안하고자 한다.

## 2. 시험개요

시험에 사용한 모형토조의 크기는 길이 192cm, 폭 44cm 그리고 높이 60cm이며, 모래지반은 40cm 깊이로 조성하였다. 시험모래로는 주문진, 영종도, 인천(1), 인천(2), 한강 모래를 사용하였다. 모든 모래는 2mm 체를 통과시켜 불순물이나 큰 입자를 거르고, 예비시험 동안에 물에 씻어 세립질 함유량을 줄였다. 이런 과정을 거쳐 시험에 사용된 모래들의 입도분포곡선은 그림1과 같다. 그림1에서 두 굵은 실선 사이의 영역은 ATC(Applied Technology Council, 1996)에서 제안한 가장 액상화하기 쉬운 모래의 입도곡선 영역을 나타낸다. 그림1에서 알 수 있듯이 시험에 사용된 모래는 모두 이 영역에 포함된다. 지반조성은 수중침강법을 사용하였다. 수위는 모래지반 표면과 일치하도록 하였으며 물의 배수는 상방향으로만 이루어진다. 시험모래들의 기본물성치는 표1에 정리하였고 각 모래에 대한 정수두시험결과는 그림2에 나타내었다. 각 모래에 대한 정수두시험은 시험결과 분석시 조성지반의 초기투수계수와 시험종료후 지반의 투수계수를 추정하기 위해 사용되어지므로 지반조성법과 마찬가지로 초기에 물드에 물을 채운후 시료를 부어 가면서 원하는 상대밀도가 되도록 고무망치로 두드려 상대밀도를 맞추었다.

표 1. 시험모래의 기본물성치

시험모래	초기상대밀도(%)		유효입경 (D <sub>10</sub> ,mm)	평균입경 (D <sub>50</sub> ,mm)	균등계수	비중	최대전조밀도 (kN/m <sup>3</sup> )	최소전조밀도 (kN/m <sup>3</sup> )
	1차진동	2차진동						
주문진모래	30	50	0.40	0.57	1.53	2.64	15.68	13.72
영종도모래	20	40	0.11	0.16	1.95	2.64	15.88	13.23
인천모래(1)	21	43	0.24	0.34	1.67	2.57	16.27	14.11
인천모래(2)	23	45	0.23	0.50	2.47	2.67	17.35	14.90
한강모래	20	41	0.21	0.50	2.57	2.61	17.05	14.11

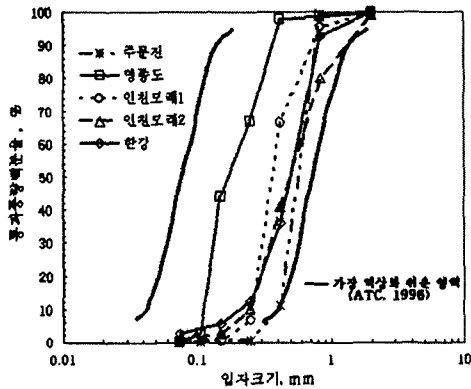


그림 1. 시험모래의 입도분포

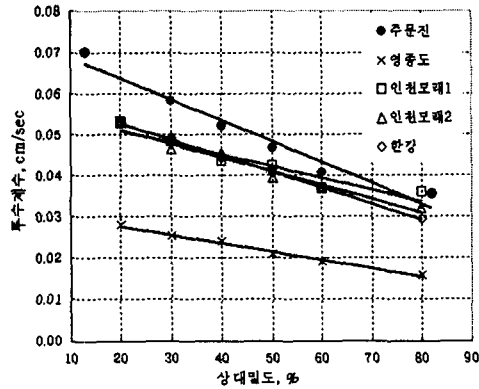


그림 2. 시험모래의 정수두시험 결과

간극수압계는 10, 20, 30, 35cm 깊이에 각각 2개씩 총 8개를 설치하였으며, 가속도계는 모형토조 중앙의 0, 10, 20, 30, 40cm 깊이에 각각 1개씩 총 5개를 설치하였다(그림3). LVDT의 위치는 그림3에 나타나 있으며, 액상화 발생시 침하측정편이 액상화된 모래 속으로 파고들지 않도록 한 변의 길이가 10cm인 정사각형이고 두께가 3mm인 경량 합판을 침하측정편과 연결하였고 또한 액상화로 인한 지반침하시 침하편이 그대로 물 위에 떠 있는 것을 방지하기 위해 격자간격으로 많은 구멍을 뚫었다(그림3).

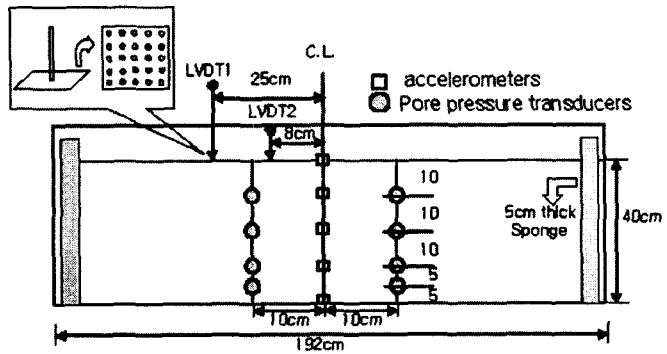


그림 3. 전단상자 및 계측기 배치도

입력지진파는 진동수 4Hz의 sine파를 사용하였으며, 각 모래별로 여러 번의 예비시험을 거쳐, 초기 조성된 지반 전체가 액상화되고 진동동안에도 발생된 과잉간극수압이 유지되도록 입력가속도와 진동지속시간을 각각 0.15g, 5초로 하였다. 단, 인천모래1의 경우에는 지속시간에 따른 과잉간극수압의 소산양상 차이를 알아보기 위해서 지속시간 3초, 7초에 대한 시험을 추가적으로 수행하였다. 또한, 각각의 시험은 1차 시험 종료후 충분한 시간을 기다려 발생된 과잉간극수압이 완전

히 소산된 것을 확인하고 2차 진동하중을 가하여 변화된 초기상대밀도에 따른 과잉간극수압 소산 양상을 살펴보았다.

### 3. 시험결과 및 분석

시험결과 분석시 J, Y, I1, I2, H는 각각 Jumunjin, Youngjong, Incheon1, Incheon2, Han river sand를 의미하며 I1(3), I1(5), I1(7)의 ()안의 수는 시험시 각각 3, 5, 7초 지속시간동안 진동하중을 가한 것을 의미한다.

#### 3.1 소산곡선 모사

침강이론에 의하면, 액상화된 지반의 액상화후 과잉간극수압 소산과정은 모래입자들의 침강과 이후 침강층의 고형화 또는 견고화 과정으로 설명된다. 또한, 모래입자와 침강 완료된 지층은 비압축성으로 가정된다. 액상화된 지역에서 특정 깊이에서 발생된 간극수압은 견고층전면이 그 깊이에 도달할 때까지는 일정하게 유지되고, 고형화가 완료된 후에는 정수압 상태까지 시간에 대해 선형적으로 감소한다. 본 연구에서는 시험모래층이 얇아 추가적인 상재압이 작용하지 않기 때문에 모래입자들과 침강완료층의 비압축성 가정이 유효한 것으로 판단된다. 또한, 이 이론이 액상화후 과잉간극수압 소산곡선을 선형으로 모사할 수 있기 때문에 적용이 용이하다. 따라서 액상화후 과잉간극수압 소산곡선을 모사하는데 침강이론을 적용하였다.

액상화후 과잉간극수압 소산곡선을 모사하는데 침강이론을 적용하기 위해서는 우선, 합리적인 소산시점을 정의하는 것이 필요하다. 진동하중 직후를 소산시점으로 정의하는 것도 하나의 수단일 수 있으나 대상지반 전깊이에서 액상화가 발생하지 않거나 발생된 과잉간극수압이 지속시간에 따라서는 진동중에도 소산할 수 있기 때문에 이러한 경우 지속시간이 적절히 선택되어야 한다.

그림4의 (a),(b),(c)는 I1 모래에 진동하중을 각각 3, 5, 7초 동안 주고 소산시점을 진동직후로 잡아 깊이에 따른 시간별 과잉간극수압의 분포를 나타낸 그림이다. 그림4에서 t=0은 진동종료시점을 의미하며 또한 소산시점을 의미한다. Florin과 Ivanov(1961)의 충격하중 시험결과와 마찬가지로 세 결과 모두 과잉간극수압의 분포곡선이 사다리꼴 모양을 보이는 것을 통

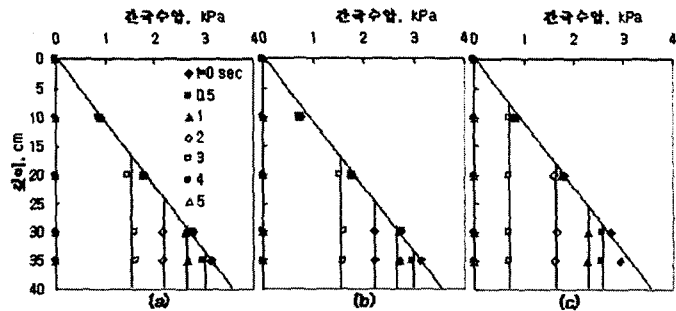


그림 4. I1 sand의 깊이에 따른 과잉간극수압분포 시간이력  
(a)지속시간 3초 (b)지속시간 5초 (c)지속시간 7초

해 견고층전면이 뚜렷이 존재함을 확인할 수 있다. 그림4에서 지속시간이 3초나 5초의 경우, 진동 직후(t=0)에서의 깊이별 과잉간극수압을 나타내는 점들은 액상화시 예상되는 과잉간극수압의 분포선 위에 위치하나 7초인 경우에는 35cm 깊이에서의 과잉간극수압을 나타내는 점이 이 선 좌측에 위치하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 지속시간이 3초, 5초인 경우에는 진동동안 전 깊이에서 과잉간극수압이 소산되지 않지만 7초인 경우에는 진동종료 이전에 최소 35cm 이상의 깊이에서는 이

미 과잉간극수압이 다소 소산되었음을 알 수 있다. 즉, 진동지속시간이 7초가 넘는 경우(하중반복 횟수가 28회를 초과하는 경우)에는 소산시점을 진동직후로 잡기는 어려운 것으로 나타났다. 따라서 진동대시험시 과잉간극수압의 소산시점을 진동직후로 잡는 경우에는 비교적 짧은 지속시간동안 진동을 가한 경우에 대해 침강이론 적용이 타당하다. 또한, 진동지속시간이 5초인 경우 하중반복 횟수는 20회이고 이는 이전 연구들에서 사용된 전형적인 하중반복횟수와 유사하다. 따라서, 본 시험에서는 진동하중의 지속시간을 5초로 하여 시험을 수행했고 진동직후를 소산시점으로 잡아 계측곡선을 모사하였다.

본 연구에서 계측곡선을 모사한 절차를 설명하면 다음과 같다.

그림5는 견고층전면의 이동속도를 구하는 방법을 설명하기 위해 예로써 나타낸 I1(3) 모래의 계측된 깊이별 과잉간극수압 시간이력 곡선이다. 그림5에서 circle로 표시된 점들은 깊이별 과잉간극수압의 소산시점으로 잡은 점들인데 견고층전면의 이동속도는 이 점들을 선형회귀한 직선의 기울기(그림5에서 m으로 표시)로 구한다.

소산 종료시점,  $t_f$ 는 아래 식(1)로써 구한다.

$$t_f = \frac{H}{m} \quad (1)$$

여기서,  $H$ 는 모형지반의 전체높이이고  $m$ 은 견고층 이동속도이다.

그리고, 그림6에서처럼 D점과 대상지반의 전체높이,  $H$ 에 수중단위중량을 곱한 값인 C점을 연결하면 바닥면에서의 과잉간극수압소산곡선이 모사된다. 따라서 임의 깊이에서의 과잉간극수압 소산곡선은 그 깊이에서의 액상화시 과잉간극수압(그림6의 A점)에서 바닥면에서의 과잉간극수압 소산곡선과 만나도록(B점) 수평으로 선을 그어 A-B-D 점을 연결하면 모사된다. 그리고 이러한 소산곡선의 기울기(소산속도),  $a$ 는 아래 식(2)로 구할 수 있다.

$$a = \frac{\gamma H}{t_f} \quad (2)$$

여기서,  $\gamma$ 은 액상화된 지반의 수중단위중량이다.

### 3.2 소산곡선 모사 결과

그림7은 앞 절에서 설명한 모사방법으로 모사한 액상화후 과잉간극수압 소산곡선과 계측된 소산곡선을 함께 나타낸 그림이다. 그림7의 (d), (e)에 각각 해당하는 I2(5)와 H(5) 모래의 경우, 모사곡선과 계측곡선간의 차이가 상대적으로 (a)~(c)의 다른 모래들에 비해 더 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 표1에서 보면 I2(5)와 H(5) 모래의 경우, 다른 모래들에 비해 균등계수가 상대적으로

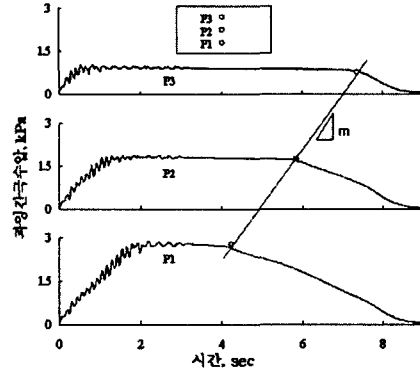


그림 5. I1(3)sand의 깊이별 과잉간극수압 시간이력

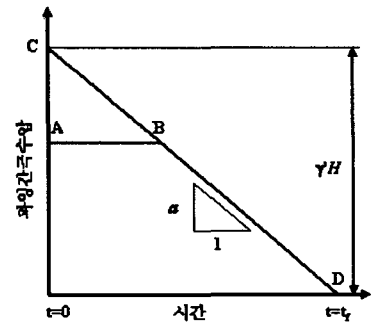


그림 6. 시료바닥/임의 깊이에서의 간극수압 시간이력 모사

로 큰 것을 알 수 있는데 상대적으로 큰 균등계수는 모래입자들이 침강이후에도 입자재배열을 통해 보다 안정된 구조를 이루려는 성향을 증가시키게 되고 이로 인해 견고화된 지반에 추가적인 압축을 발생시켜 과잉간극수압이 발생되고 추가적으로 발생된 과잉간극수압이 전체 과잉간극수압의 소산을 지체시키기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 제시된 모사방법은 상대적으로 균등계수가 큰 모래지반의 소산곡선을 모사할 때는 다소 한계를 갖는다. 또한, 그림7의 (a)~(e)의 P<sub>1</sub> 위치에서 모사곡선과 계측곡선과의 차이를 볼 수 있듯이, 모든 모래에 대해서는 소산시점을 진동직후로 잡은 것으로 인해 진동종료 이전에 바닥면에 가까운 깊이에서 소산이 미리 발생할 수 있어서 소산초기, 바닥면에 가까운 깊이에서의 소산곡선모사도 다소 한계를 갖는다. 하지만, 그림7의 (a)~(e)에서 보듯이 이러한 모사방법은 전반적으로 계측치를 잘 모사하는 것으로 나타났다.

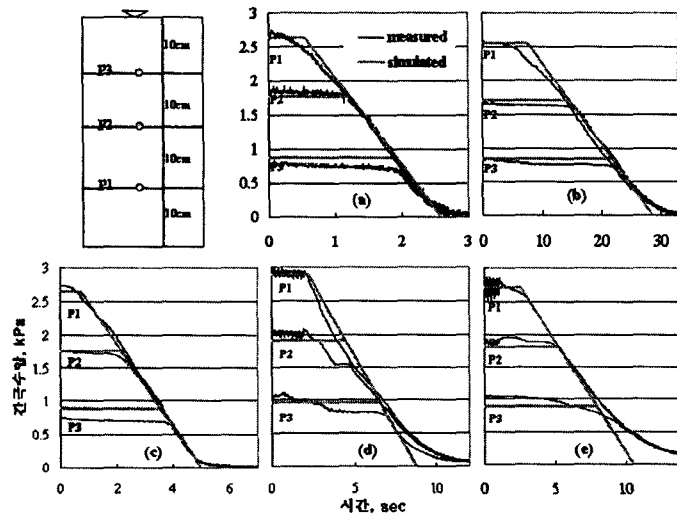


그림 7. 침강이론으로 모사한 액상화후 과잉간극수압 소산곡선과 계측곡선과의 비교  
(a)J(5), (b)Y(5), (c)I1(5), (d)I2(5), (e)H(5) 모래

### 3.3 액상화후 과잉간극수압 소산곡선 예측 절차

앞 절에서 제시한 침강이론을 이용한 방법으로 계측된 과잉간극수압 소산곡선을 모사하였고 선형적으로 모사한 소산곡선의 기울기, a 즉, 소산속도를 가지고 액상화후 과잉간극수압의 소산양상을 살펴보았다.

그림8은 하중지속시간을 5초로 하였을 때의 5가지 모래의 각각 두가지 초기상대밀도(표1 참조)에 대한 유효

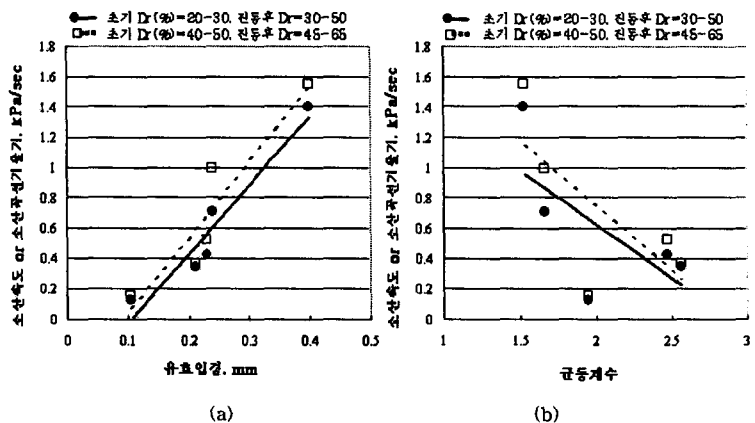


그림 8. 소산속도와 (a)유효입경, (b)균등계수와의 관계

입경과 균등계수에 따른 과잉간극수압의 소산속도를 나타낸 것이다. 그림8의 (a),(b)에서 실선과 점선은 각각 초기상대밀도 20~30%, 40~50%일 때의 결과에 대한 경향선이다. 그림에서 보듯이 유효입경은 클수록 또한 균등계수는 작을수록 과잉간극수압의 소산속도는 증가함을 알 수 있다. 이러한 이유는 유효입경의 증가와 균등계수의 감소는 지반의 투수성을 증가시키고 지반의 투수성 증가는 과잉간극수압의 소산속도를 증가시키는 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다.

그림9는 이러한 두가지 입도특성치를 함께 고려하여 소산속도와 상관계수를 나타낸 것인데 소산속도는 유효입경을 균등계수로 나눈 값에 선형적인 관계를 가지는 것으로 나타났다. 그림9에서 실선과 점선은 각각 초기상대밀도 20~30%, 40~50%일 때의 결과에 대한 회귀곡선이다. 그림에서 이러한 소산속도는 시험모래의 유효입경과 균등계수에 따라 최대 14배(회귀곡선기준)까지도 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

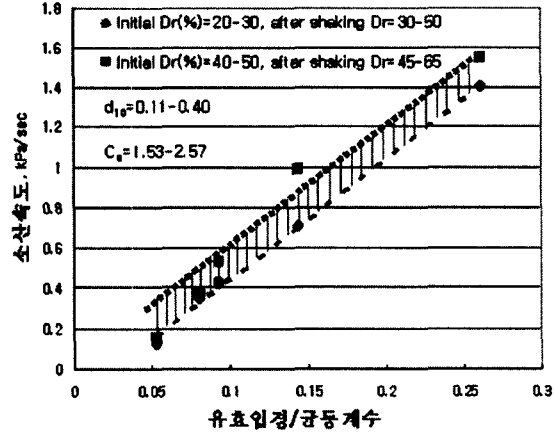


그림 9. 소산속도와 입도특성치 상관관계

또한 그림8과 9에서 알 수 있듯이 소산속도는 입도특성외에 초기상대밀도의 영향도 받는 것으로 나타났는데 이는 엄밀히 말하면 초기상대밀도가 크면 같은 하중에 대해 진동직후 상대밀도가 커지므로 진동직후 상대밀도의 영향이라 할 수 있다. 입도특성이 같은 경우, 진동직후 상대밀도가 증가하면 소산속도는 모든 모래에 대해 다소 증가함을 볼 수 있는데 이는 진동직후 상대밀도의 증가는 지반의 투수성을 감소시켜 소산속도를 감소시키는 역할도 하지만, 소산동안에 발생할 수 있는 지반의 압축성을 감소시켜 입자 침강 거리를 짧게 함으로써 소산속도를 증가시키는 역할에 더 기여하기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 소산속도는 유효입경을 균등계수로 나눈 값에 선형으로 증가하는 상관관계를 가지며 초기상대밀도의 증가는 이러한 상관곡선을 소산속도가 증가하는 방향으로 이동시키는 역할을 하게 된다. 따라서 그림9의 빗금친 영역은 가장 느슨한 상태(Dr=20~30%)에서 중간 정도의 상대밀도(40~50%)까지 초기상대밀도에 따라 유효입경/균등계수와 소산속도와 상관계수의 상관관계곡선이 이동될 수 있는 범위를 나타낸다.

이상의 결과로부터, 진동지속시간이 비교적 짧은 중·약진 지역에 위치하면서 액상화를 겪는 포화된 모래지반의 액상화후 과잉간극수압의 소산곡선을 근사적으로 예측하고자 하는 경우에는 먼저, 지반의 초기상대밀도, 유효입경과 균등계수값이 얻어져야 한다. 이 값들로부터 소산곡선의 기울기,  $a$ 는 그림9나 아래 식(3)과 같은 상관관계식으로부터 얻어질 수 있다. 여기서 상관관계식 식(3)은 그림 9에서 두 직선사이의 평균값에 해당된다. 소산종료시점,  $t_f$ 는 아래 식(4)로부터 산정될 수 있다. 마지막으로, 소산곡선은 앞서 제시한 침강이론에 의한 소산곡선모사방법에 의해 얻어질 수 있다.

$$a = \alpha \cdot \frac{D_{10}}{C_u} + \beta \quad (3)$$

여기서,  $D_{10}/C_u$  는 유효입경을 균등계수값으로 나눈 값이다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 상관계수로서 각각 6.35와 -0.15값을 가진다(20~50% 초기상대밀도에 대한 평균값).

$$t_f = \frac{\gamma'H}{a} \quad (4)$$

#### 4. 결 론

본 연구에서는 액상화 가능성이 큰, 상이한 입도특성(유효입경=0.11~0.40mm, 균등계수=1.53~2.57)을 갖는 5종류의 시험모래에 대해 1-g 진동대시험을 수행하여 깊이별 시간에 따른 과잉간극수압과 지표면침하량 측정결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 액상화후 과잉간극수압의 소산속도는 유효입경을 균등계수로 나눈 값에 선형으로 증가하는 상관관계를 가지며 초기지반의 상대밀도는 이러한 상관곡선을 소산속도가 증가하는 방향으로 이동시키는 역할을 하는 것으로 나타났다.
2. 입도특성이 같은 경우 초기상대밀도가 증가하면 소산속도는 다소 증가하는 것으로 나타났다.
3. 액상화후 과잉간극수압 소산속도와 시험모래의 입도특성치와의 상관관계로부터 진동지속시간이 비교적 짧은 중·약진 지역에 위치하면서 액상화를 겪는 포화된 모래지반의 액상화후 과잉간극수압의 소산곡선을 근사적으로 예측하는 방법을 제시하였다.

#### 참고문헌

1. Florin, V. A. and Ivanov, P. L., "Liquefaction of Saturated Sandy Soils", Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, 1, 1961, pp.107-111.
2. Scott, R. F., "Solidification and Consolidation of a Liquefied Sand Column", Soils and Foundation, Vol.26, No.4, 1986, pp.23-31.
3. Applied Technology Council, "Improved Seismic Design Criteria for California Bridges: Provisional Recommendations, ATC-32", California Dep. of Transportation, 1996, pp. 92.
4. Kokusho, T., "Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread", J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, 125(4), 1999, pp.817-826.
5. Tsurumi, T., Mizumoto, K. and Okada, S., "Experimental consideration on the mechanism of liquefaction", Proc., 12th World Conf. on Earthq. Engrg., Auckland, 2000, Paper No.2405.