

# 변형률제어 진동삼축시험법을 이용한 석탄회가 혼합된 모래시료의 액상화 평가

## Liquefaction Potential for Coal Ash Mixed Sand by Strain-Controlled Cyclic Triaxial Test

이 병 식\*<sup>1</sup> Lee, Byung-Sik  
정 경 순\*<sup>2</sup> Jeong, Kyoung-Soon

### Abstract

To evaluate a liquefaction potential for a coal ash mixed sand deposit, a series of strain-controlled cyclic triaxial tests were conducted for reconstituted specimens of pure sand and coal ash mixed sand. A key advantage of the strain-controlled approach compared with the stress-controlled approach is that the amount of generated pore pressure can be apparently related with the shear strain amplitude. As a result of the experiments conducted in this study, it was verified that pore pressures were developed little even after applying a number of shearing cycles, if the shear strain amplitude was less than the cyclic threshold strain. On the other hand, pore pressures tended to develop when the shear strain amplitude became greater than the cyclic threshold strain. The content of coal ash was also found to affect the pore pressure generation. It was verified as a general tendency that higher pore pressures were generated with increasing the content of coal ash up to 30%. In addition, the pore pressures generated in ash mixed specimens were found to be higher than those in pure sand specimens under a condition of shear strain level approximately less than 0.1%, and vice versa when the strain level became higher. On the basis of the results obtained from this study, it was concluded that the coal ash mixed sand deposit, of which the coal ash content was less than 30%, could be unstable for seismic loadings due to liquefaction.

### 요 지

본 논문에서는 석탄회 매립지반의 액상화 가능성을 평가하기 위해 순수 모래시료와 더불어서 모래시료와 석탄회가 혼합된 모래시료에 대한 일련의 진동삼축시험을 변형률제어 방법으로 수행하였다. 실험결과 진동하중에 의해서 시료 내에 발생하는 간극수압의 크기는 작용하는 전단변형률의 크기에 심각하게 영향을 받고, 작용하는 전단변형률이 지반의 한계전단변형률 보다 작은 경우에는 진동수가 높은 조건에서도 간극수압이 발생하지 않음을 알았다. 또한 전단변형률이 약 0.1% 보다 작고 한계전단변형률에 가까운 경우에는 순수 모래시료와 비교하여 본 논문에서 조사한 석탄회 함유율 범위 (10%~30%)의 시료에서 간극수압이 더 크게 발생하였다. 반면에, 전단변형률이 큰 경우에는 순수 모래시료에서 간극수압이 크게 발생하는 추세를 보였다. 반복 전단에 따른 간극수압의 발생량은 전반적으로 석탄회 함유율이 증가할수록 커지는 경향을 보였다. 이러한 결과를 근거로 해안이나 하천에 인접한 한계지 개발에 있어서 사실토에 석탄회를 혼합 매립하여 지반을 조성하는 경우에 액상화에 대해서 불안정한 지반이 될 가능성이 있는 것으로 판단되었다.

**Keywords :** Coal ash mixed sand, Liquefaction potential, Stain-controlled cyclic triaxial test

\*1 정희원, 공주대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수

\*2 정희원, 공주대학교 대학원 토목공학과

# 1. 서론

최근 석탄화력발전소의 부산물인 석탄회(Coal Ash)를 성토재 혹은 매립재로써 사용하기 위한 연구가 상당히 진행되어 있으며 그 적용성 또한 양호한 것으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 석탄회를 매립토로 사용할 경우에 조성된 매립지반에 대한 동적 특성을 연구한 결과는 많지 않다. 특히 매립지반이 사질토와 석탄회가 혼합된 매립토로 조성되는 경우에 동적 특성 가운데에서도 액상화 가능성을 평가해야 할 필요가 있다. 그 이유로 석탄회는 실트질 흙의 성질을 가지며, 모래와 실트가 혼합된 재료에 대한 액상화 특성을 평가한 연구(황대진, 1993; Erten과 Maher, 1994)에 의하면 실트 함유량에 따라서 혼합재료의 액상화 가능성이 매우 높은 경우가 있는 것으로 평가되고 있기 때문이다. 한편, 장학순(2000)은 석탄회가 혼합된 모래의 액상화 강도를 응력제어 방식의 반복삼축실험으로 평가한 바 있다. 이 시험결과에서 이들 시료의 액상화 가능성이 어느 정도 밝혀진 바 있다.

이와 같은 배경에서 정경순(2001)은 석탄회 매립지반의 액상화에 대한 안정성을 보다 명확하게 평가함에 목표를 둔 시험연구를 수행하였으며, 여기에서 조사된 결과를 본 논문에서 요약하여 논하고자 한다. 정경순(2001)의 연구에서는 순수 모래시료와 더불어서 모래와 석탄회를 적정비율 혼합한 시료에 대해서 변형률제어 방식으로 일련의 진동 삼축시험을 수행하였다. 시험결과로부터 변형률과 진동수에 따른 간극수압의 변화 양상을 규명하고, 이를 이용하여 석탄회 매립지반의 액상화 판정 목적으로 활용코자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 변형률제어 진동 삼축실험

진동삼축실험(Cyclic Triaxial Test)은 반복전단시험(Cyclic Simple Shear Test), 반복비틀전단시험(Cyclic Torsional Shear Test)과 더불어서 사질토의 액상화 평가를 위한 시험방법으로 널리 이용되고 있다. 진동삼축시험은 시험 전과정에서 반복하중의 크기가 일정한 응력제어 (Stress-Controlled)방법이나 반복전단변형률이 일정한 변형률제어 (Strain-Controlled)방법으로 수행된다.

이중 본 논문에서 적용한 변형률제어방법은 응력제어

방법과 비교하여 상대적으로 유리한 특성을 가진 시험 방법이다. 응력제어방법에서는 시료에 발생하는 간극수압, 즉 시료의 동적응답 특성이 시료의 초기 강도, 강성, 구속응력, 시료의 교란상태 등과 같은 인자들에 의해 심각하게 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Vucetic과 Dobry, 1988). 반면에 변형률제어방법에서는 이들 인자의 영향을 어느 정도 배제할 수 있어 주어진 전단변형률과 진동수에 대해서 이들 영향인자에 상관없이 간극수압의 발생특성에 일관성이 있다. 결과적으로 반복전단변형률을 간극수압의 발생양상을 지배하는 기본 변수로 간명하게 관련지을 수 있다는 장점이 있다.

변형률제어 실험에서 시료에 작용하는 응력상태는 응력제어 방식에서 작용하는 응력과 동일하게 적용된다. 즉, 전단면에 작용하는 전단응력  $\tau$ 는 축차응력  $\sigma_a$ 와  $\tau = 0.5 \sigma_a$ 의 관계에 있다. 한편, 삼축시험 조건의 연직변형률  $\epsilon_a$ 는 전단변형률  $\gamma$ 와  $\gamma = 1.5 \epsilon_a$ 의 관계에 있는 것으로 보면 적절한 것으로 알려져 있고(Vucetic과 Dobry, 1988), 이 관계를 이용하여 변형률제어 진동삼축조건을 결과를 반복전단시험의 조건으로 변환할 수 있다.

### 2.2 대상 시료 및 성형방법

본 연구에서는 순수 모래시료로 주문진 표준사를 사용하였다. 석탄회는 보령화력발전소에서 부산물로 발생하는 것으로 발전소에서 자연 발생하는 비율, 즉 비회와 저회의 비율이 약 8:2인 혼합회를 사용하였다. 본 시험에서 사용한 석탄회의 물리적 특성(장학순, 1999)을 표 1에 정리하여 보였다.

본 논문의 시험 대상시료는 순수 모래로 성형한 시료와 모래에 석탄회를 혼합하여 성형한 혼합시료들이다. 혼합시료는 석탄회의 혼합비율(중량비)에 따라 표 2에 보인 바와 같이 정의한 명칭으로 부르기로 하였다. 이들

표 1. 보령화력 석탄회의 물리적 특성

구분	특성치
비중	2.04
액성한계	NP
소성한계	NP
No.4 체 통과량	98.7
No.200 체 통과량	40.5
균등계수( $C_u$ )	2.5
곡률계수( $C_c$ )	0.9
통일분류	SM

표 2. 실험 대상 시료의 종류 및 명칭

혼합비율(모래:석탄회)	명 칭
100 : 0	모래시료 (Sand)
90 : 10	혼합시료 A (Sample A)
80 : 20	혼합시료 B (Sample B)
70 : 30	혼합시료 C (Sample C)

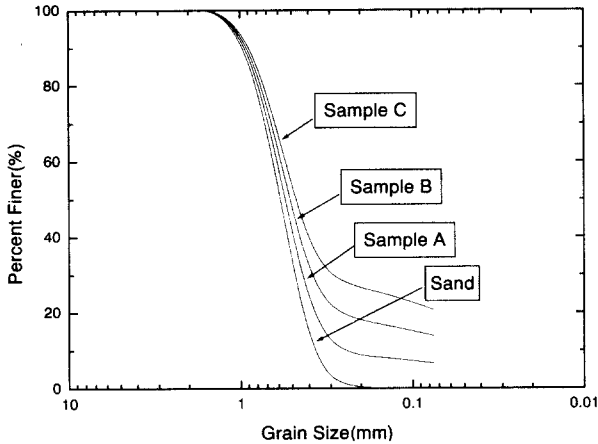


그림 1. 각 시료의 입도 분포곡선

각 시료에 대한 입도 분포곡선은 그림 1에 보인 바와 같다.

교란시료의 성형 방법에는 수중 낙하법, 습윤 다짐법, 진동 다짐법, 공중 낙하법 등의 방법이 있다. 본 논문에서는 깔대기에 재료를 담아 분할 몰드 안에 공중 낙하시키는 방식으로 시료를 성형하였으며, 건조밀도에 대한 시료의 무게를 감안하여 상대밀도 50%로 조절하였다.

시료가 전체적으로 균등한 밀도를 갖도록 성형하기 위해서는 건조된 시료를 몰드 안으로 계속해서 유입시켜야 하므로 성형하려는 시료를 한번에 담을 수 있을 정도의 크기를 가진 깔대기를 사용하였다. 시료의 크기는 직경 50mm, 높이 100mm로 제작하였으며, 시료 속의 공기를 제거하기 위해 시료 속에서 기포가 더 이상 발생하지 않을 때까지 진공압을 2~3시간 가한 후 다음 단계인 배압 포화를 실시하였다.

### 2.3 시료의 포화, 압밀, 전단

시료의 포화단계에서 유효응력은 10 kPa로 유지하였다. 약 40 kPa정도의 배압을 가하는 초기 포화단계는 약 2시간 이상 유지시키는 것이 바람직하였다. 배압은 20 kPa/hr의 간격으로 점차적으로 증가시켜 최대 200 kPa까지 증가시켰다. 이 때 셀 압력의 최대치는 210 kPa이

되었다.

압밀 시에 가해야 할 유효구속응력이 큰 경우에 혹은 반복전단 시 취하고자 하는 하중의 반복주기가 짧은 경우에는 배압포화 시에 가할 수 있는 셀 압력이 제한되었다. 본 연구의 실험에 있어서는 두 번째 이유 때문에 셀 압력을 210 kPa 이하로 제한하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 따라서 최대배압이 200 kPa로 제한되어 많은 경우에 시료의 포화과정이 용이하지 않았고, 장시간의 포화 과정을 거친 후에 비로소 원하는 포화도를 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 간극수압계수 B 값이 0.96 이상인 경우를 완전포화상태로 보고 다음 단계인 압밀을 실시하였다.

본 실험에서는 모든 시료에 대해서 100 kPa의 유효응력 조건에서 등방압밀로 간극수압이 0이 될 때까지 시료를 압밀하였다. 압밀 중에 체적변형률에 더 이상 변화가 없으면 압밀이 완료된 것으로 보았다.

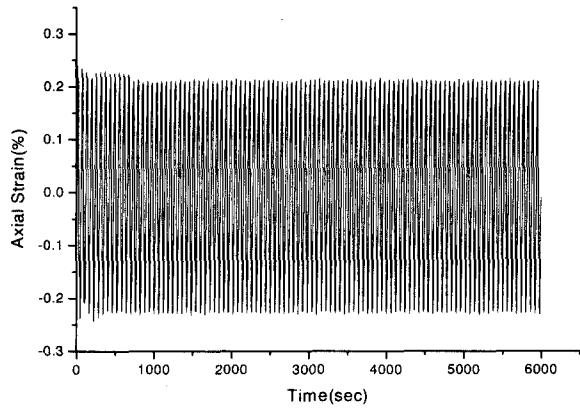
변형률제어 진동 삼축실험에서는 주어진 전단변형률에 대해서 시료의 액상화 현상이 발생하지 않으면 같은 시료에 대해 다른 변형률에 대한 실험을 계속 수행할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 작은 변형률로부터 시작하여 전단을 실시하고, 시료의 액상화가 발생하지 않는 경우에 같은 시료에 대해서 변형률을 증가시키면서 실험을 실시하였다. 같은 시료에 대해서 다음 단계의 변형률에 대한 전단과정을 시행하는 경우에 전단에 앞서서 압밀 과정을 다시 거침으로써 전 단계에서 발생한 과잉 간극수압을 소산시켰다. 이러한 단계시험(stage testing)의 각 단계에서 시료의 밀도변화를 예상할 수 있으나 이들 영향은 고려하지 않았다.

전단주기는 시험기 내의 간극수압 평형을 유지함으로써 간극수압을 정밀히 측정하기 위해 Erten과 Maher (1995)가 적용한 바와 동일하게 1회/분으로 적용하였다. 그러나, 축방향 변형률이 0.5%인 경우에는 기계적으로 불가능하여 0.5회/분의 더 느린 전단주기를 적용하였다.

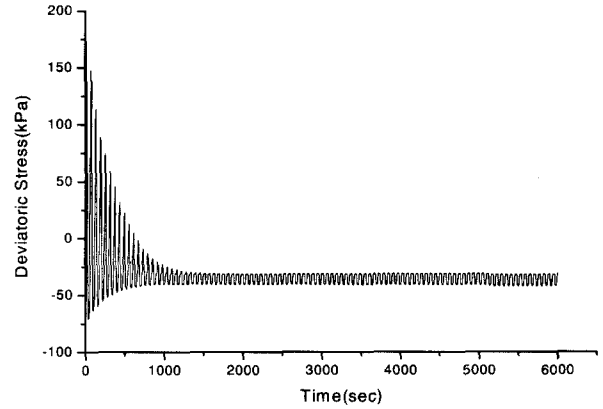
## 3. 시험결과 및 분석

### 3.1 대표적 시험결과

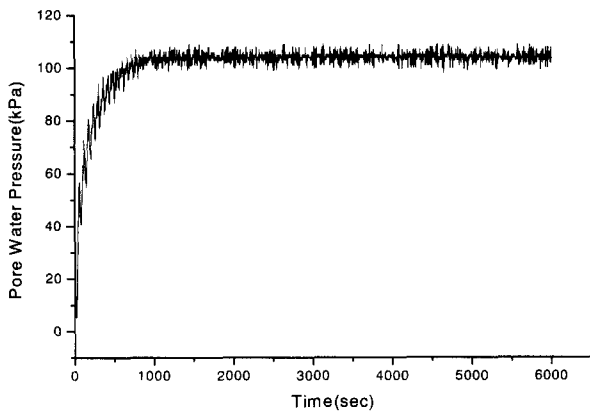
본 연구의 시험에서는 표 2에 보인 각 시료에 대해서 모래시료는 0.015%, 0.1%, 0.25%, 0.5%, 혼합시료는 0.015%, 0.1%, 0.3%, 0.5%의 최대 축방향 변형률에 대한 반복전단을 시행하였다. 이러한 일련의 실험결과 중



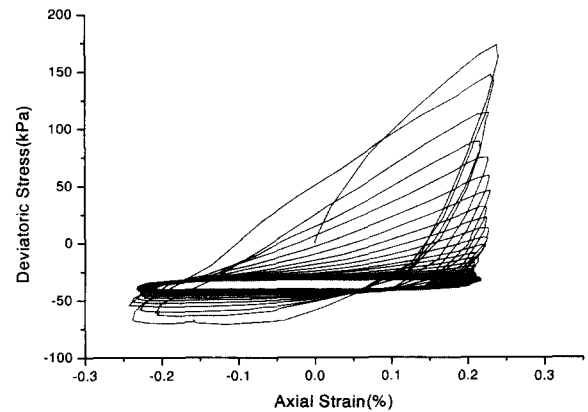
(a) 시간에 따른 축방향 변형률의 변화



(b) 시간에 따른 축차응력의 변화



(c) 시간에 따른 간극수압의 변화



(d) 축방향 변형률과 축차응력의 관계

그림 2. 실험결과의 예(모래시료,  $\epsilon_a = 0.25\%$ )

대표적으로 축방향 변형률 0.25%에서 모래시료에 대해 얻은 시험결과를 그림 2에 보였다.

그림 2(b)의 결과에서 축차응력은 시간이 지남에 따라서 점차적으로 작아지는 추세를 보인다. 이는 전단변형률을 일정하게 유지하기 위해 전단 초기에는 큰 축차응이 작용하나 간극수압이 상승함에 따라 작은 축차응으로도 원하는 변형률을 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

시간에 따른 간극수압의 변화를 살펴보면 반복하중이 진행됨에 따라 간극수압이 증가하며 간극수압이 유효구속압에 도달하였을 때 시료에 작용하는 유효응력이 0이 되어 액상화가 발생되었다고 볼 수 있다.

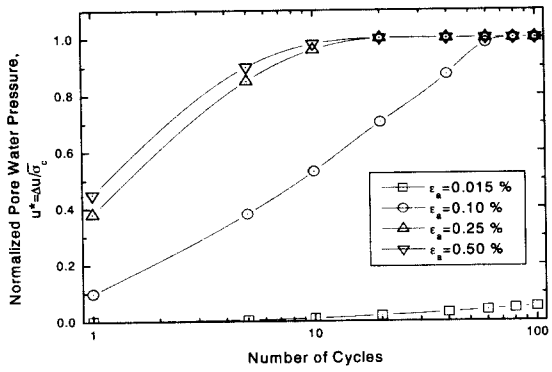
### 3.2 시험결과 및 분석

각 시료에 대해서 진동 삼축실험으로부터 얻은 결과를 시험에서 적용한 변형률 조건에서 진동수에 대한 간극수압의 변화양상으로 정리하여 그림 3에 보였다. 이 그림에서 간극수압은 유효구속압에 대해서 정규화시켜

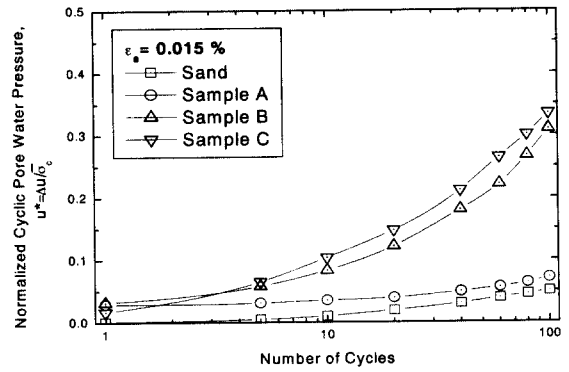
나타냈다. 그림의 결과에서 모든 시료에 대해 진동수가 증가함에 따라서 간극수압이 증가하고 있다. 또한, 전단시에 적용한 축방향 변형률이 증가할수록 진동수가 증가함에 따른 간극수압의 크기도 증가되는 추세를 보여 문헌(Vucetic과 Dobry, 1988; Erten과 Maher, 1995)에서 알려진 바와 같은 반복전단에 대한 시료의 동적 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다.

한편, 동일한 변형률에서 시료 내에 발생하는 간극수압의 크기를 진동수와 시료의 종류에 따라 비교해 보기 위해서 시험결과를 그림 4와 같이 정리하여 보였다.

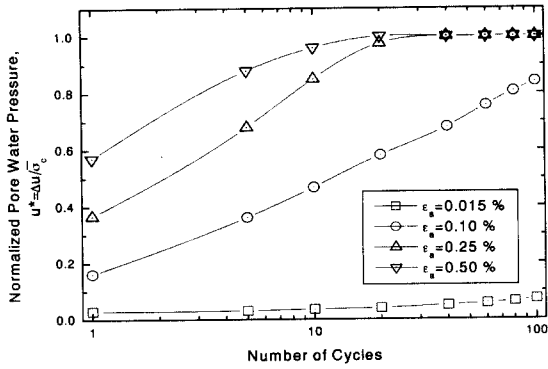
비교적 작은 변형률( $\epsilon_a = 0.015\%$ ) 조건에 대한 결과인 그림 4(a)에서 판단하면, 석탄회 혼합비율이 높아질수록 순수 모래시료의 경우보다 진동횟수가 증가함에 따른 간극수압의 증가량이 커지는 추세를 나타냄을 알 수 있었다. 반면에 변형률이 비교적 큰 경우에 대한 결과인 그림 4(b)~(d)에서 보면 전단 초기단계인 진동수가 적은 경우를 제외하고는 진동수가 증가할수록 간극수압의 크기가 모래의 경우보다 작아져 혼합시료의 액



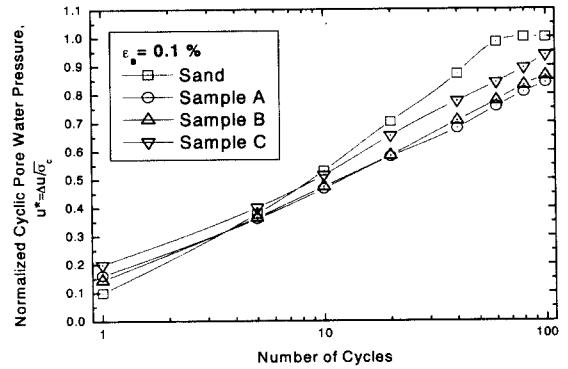
(a) 모래 시료



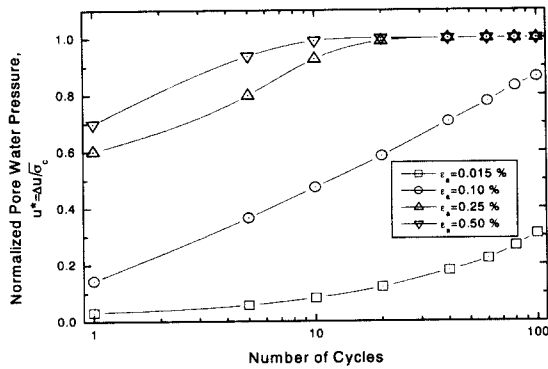
(a)  $\epsilon_a = 0.015\%$



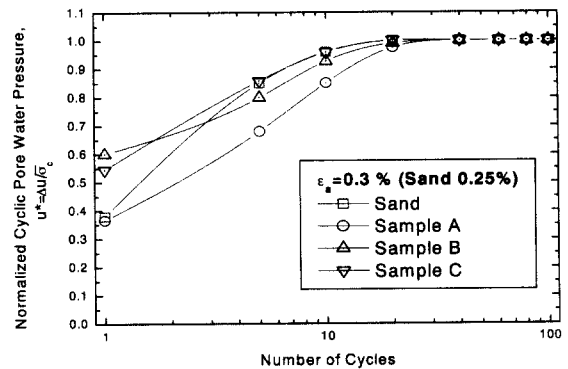
(b) 혼합시료 A



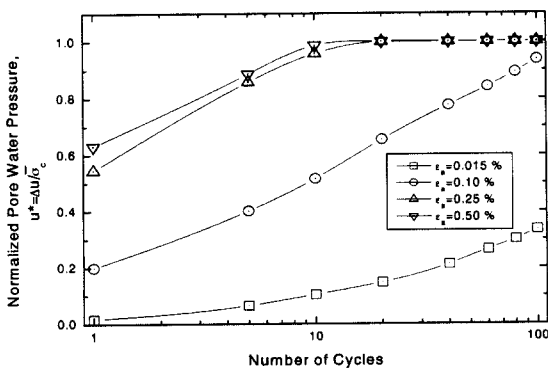
(b)  $\epsilon_a = 0.1\%$



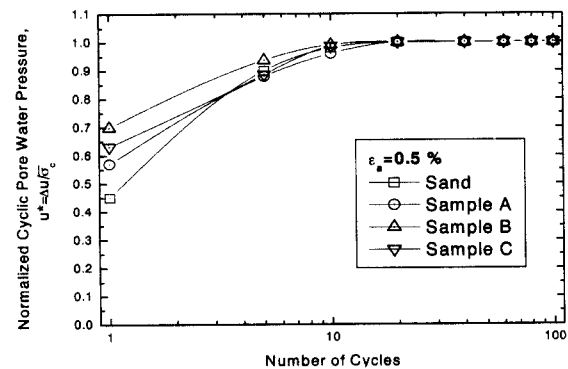
(c) 혼합시료 B



(c)  $\epsilon_a = 0.3\%$ (단, 모래시료에 대해서는  $\epsilon_a = 0.25\%$ )



(d) 혼합시료 C



(d)  $\epsilon_a = 0.5\%$

그림 3. 간극수압에 대한 변형률과 진동수의 영향

그림 4. 동일한 변형률에서 진동수에 따른 시료 별 간극수압의 변화

상화 저항강도가 커지는 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 예를 들어 변형률이 0.1%인 경우에 대한 결과인 그림 4(b)에서 순수 모래시료인 경우 진동수 80회에서 간극수압비가 1.0이 되어 액상화가 발생하는 추세를 보였으나 나머지 혼합시료는 액상화가 발생하지 않았다.

그림 4의 결과에서 간극수압의 발생량은 전반적으로 석탄회 함유율이 많아질수록 커지는 경향을 나타냈다. 소성도가 낮은 실트를 함유한 모래에 대해서 실트의 함유량을 변화시키면서 시료에 발생하는 간극수압 발생량을 조사한 Erten과 Maher(1995)의 연구결과에 따르면 실트함유량이 10%에서 30%로 증가하는 영역에서는 간극수압의 발생량이 실트의 함유량이 증가함에 따라 함께 증가하는 추세를 보였다. 본 논문에서 적용한 석탄회 함유율은 앞서 표 2에 보인 바와 같이 10%에서 30% 사이로 간극수압의 발생추세에 있어서 이들과 유사한 결과를 얻었음을 알 수 있었다.

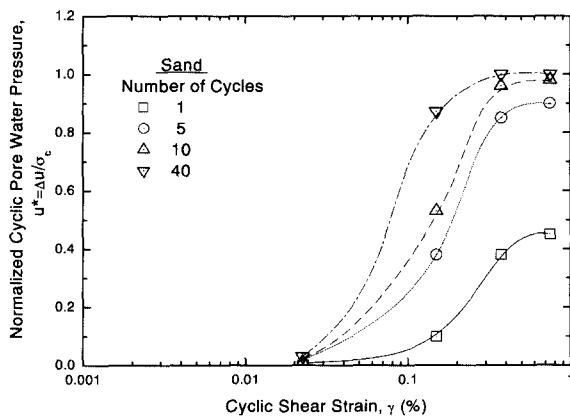
변형률이 0.25% 이상이 되는 그림 4(c)~(d)의 결과에

서 진동수가 약 20회 이상이 되면 모든 시료에 대해서 간극수압비가 1.0이 되어 액상화가 발생하는 추세를 보였다.

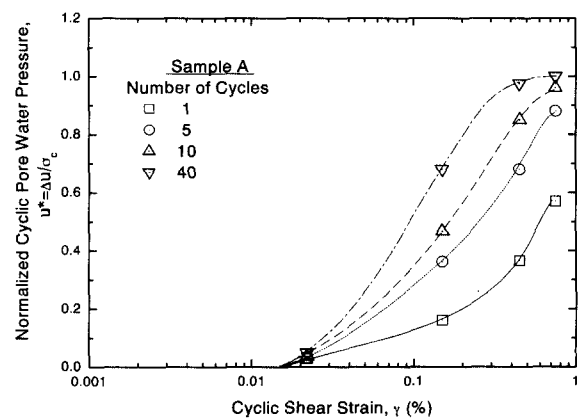
본 시험에서 시험한 각 시료조건에서 진동수와 전단 변형률에 대한 간극수압의 발생특성을 검토하기 위해서, 시험에서 얻은 결과들에 대해 2.1 절에서 설명한 바와 같이 축방향 변형률( $\epsilon_a$ )을 반복전단시험에 대한 전단 변형률( $\gamma$ )로 변환하고, 각 진동수에서 전단 변형률에 대한 간극수압의 발생 양상을 그림 5에 나타냈다.

그림 5의 결과에서 전단 변형률이 작은 경우에는 진동수에 상관없이 시료 내에 과잉간극수압이 발생하지 않는 한계전단 변형률( $\gamma_c$ )이 존재함을 알 수 있었다. 한계전단 변형률이 상대적으로 작다는 것은 그만큼 액상화에 저항하는 강도가 낮음을 의미한다.

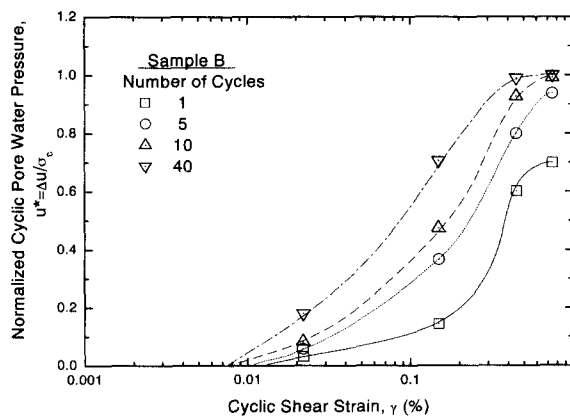
또한 그림 5의 결과에서 변형률이 비교적 작은 영역에서는 진동수가 간극수압의 발생 크기에 미치는 영향이 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 시료의 한



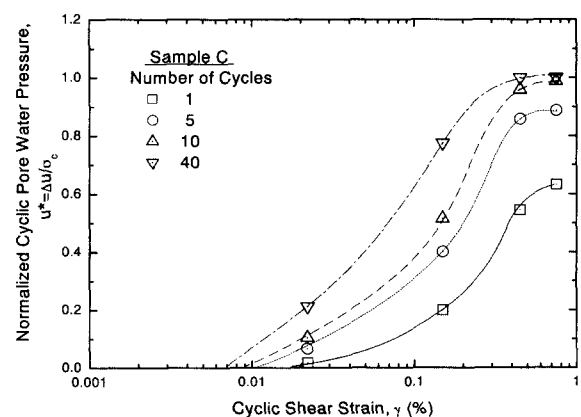
(a) 모래시료



(b) 혼합시료 A



(c) 혼합시료 B



(d) 혼합시료 C

그림 5. 진동수와 변형률에 따른 시료 별 간극수압의 변화

계전단변형률은 진동수에 따라서 크게 변화하지는 않았다. 그러나 변형률이 한계전단변형률 이상으로 큰 조건인 경우에는 간극수압의 발생량이 진동수가 증가함에 따라서 매우 커졌다. 진동수가 10 이상이 되면 시료에 발생하는 간극수압이 유효구속압의 크기와 동일하게 증가되어 시료에 액상화가 발생하는 현상을 볼 수 있었다.

#### 4. 액상화 평가를 위한 시험결과의 활용

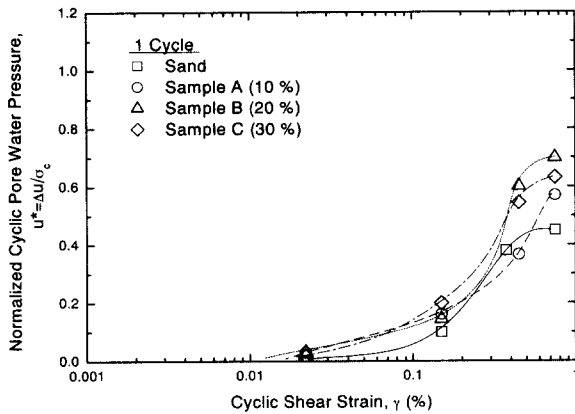
3절의 시험결과에서 살펴본 바와 같이 진동하중에 의해서 지반 내에 발생하는 간극수압의 크기는 하중에 의해 지반에 작용하는 전단변형률의 크기에 심각하게 영향을 받고, 작용하는 전단변형률이 지반의 한계전단변형률 보다 작은 경우에는 진동수가 높은 조건에서도 간극수압이 발생하지 않음을 알았다. 이러한 사실은 한계전단변형률을 지반의 액상화 가능성 평가하기 위한 지

표로서 활용할 수 있음을 시사한다.

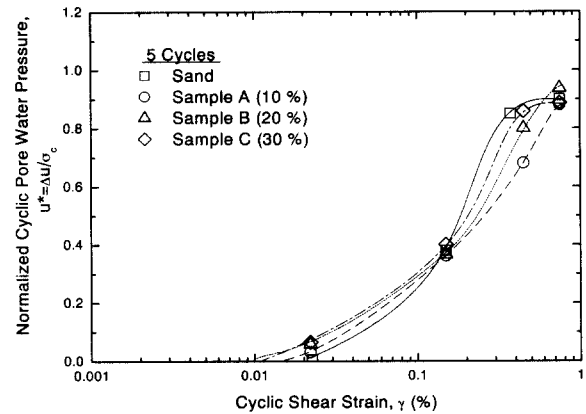
한계전단변형률에 근거하여 지반의 액상화를 평가하기 위해서는 지진의 규모에 상응하는 등가반복전단진동수에 대한 지반의 한계전단변형률을 변형률제어 전단시험으로부터 구한다. 여기서, 등가 반복전단진동수는 규모 5.25~8.5의 지진에 대해서 2~26의 진동수를 적용하는 것이 적당한 것으로 알려져 있다(Seed 등, 1983). 결정된 한계전단변형률에 대해서 지반조건과 경계조건을 고려하여 구한 임계가속도( $a_t$ )는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{a_t}{g} = \frac{\gamma_t^c (G/G_{max})_t}{gz r_d} v_s^2$$

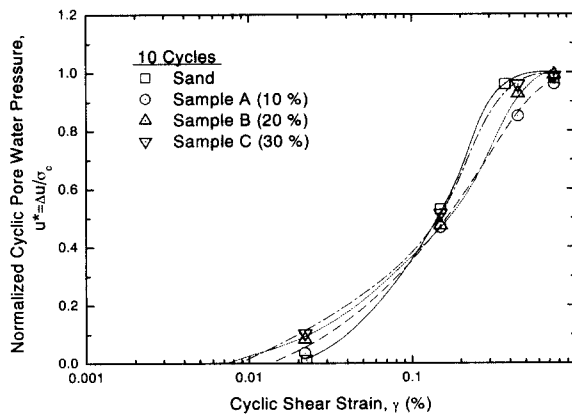
여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $G/G_{max}$ 는 한계전단변형률 ( $\gamma_t^c$ )에 대한 전단탄성계수의 정규값,  $z$ 는 지반의 관심 깊이,  $v_s$ 는 지반의 전단파 속도,  $r_d$ 는 Seed와 Idriss (1971)가 제안한 응력감소계수이다.



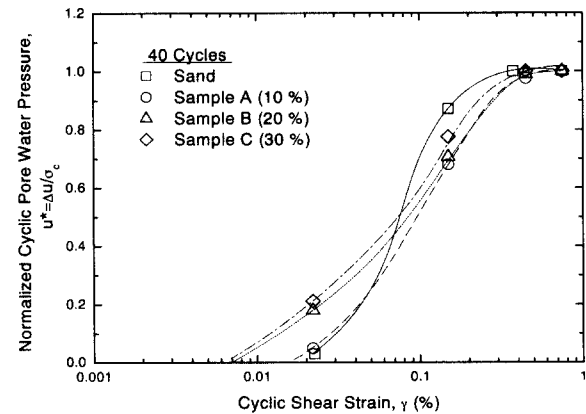
(a) 진동수 1회



(b) 진동수 5회



(c) 진동수 10회



(d) 진동수 40회

그림 6. 동일한 진동수에서 전단변형률에 따른 시료 별 간극수압의 변화 비교

이렇게 구한 임계가속도  $a_c$  값이 지진에 의해서 지표면에 발생하는 지반가속도의 최대값  $a_p$  보다 작아 ( $a_c < a_p$ ) 정해진 기준에 미달하는 경우에 액상화에 대한 대책이 필요한 것으로 판단할 수 있다. 일반적으로 지반의 한계전단변형률이 클수록 액상화 가능성이 낮아지는 것으로 추정할 수 있다.

앞에서 설명한 방법으로 본 논문에서 시험한 각 시료에 대한 액상화 가능성을 비교해 보기 위해서, 그림 5의 결과를 동일한 진동수에 대해서 정리하여 그림 6과 같이 나타냈다.

그림 6의 결과에서 각 시료에 대한 한계전단변형률을 서로 비교해 보면 모든 진동수에서 모래시료일 경우 값이 가장 크고 석탄회 혼합비가 증가함에 따라서 점차적으로 작아지는 추세를 보였다. 같은 추세로 각 시료에 대해 한계전단변형률 주변조건에서 간극수압 발생 양상을 살펴보면 석탄회의 혼합비가 커질수록 증가량이 커지는 경향을 보였다. 그러나 전단변형률이 한계전단변형률보다 큰 중간정도의 변형률 조건에서 간극수압의 발생량은 모래일 경우 가장 크고 석탄회 함유량이 클수록 작아지는 추세를 보임에 주목할 필요가 있었다. 즉, 실제로 액상화에 의한 간극수압비가 100%가 되는 변형률은 순수모래의 경우가 혼합시료의 경우보다 작은 추세를 보였다.

## 5. 결 론

변형률제어 진동삼축시험을 이용하여 석탄회가 혼합된 사질토 지반의 액상화 가능성을 평가하기 위한 본 논문의 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 진동하중에 의해서 석탄회를 혼합한 시료 내에 발생하는 간극수압의 크기는 작용하는 전단변형률의 크기에 가장 크게 영향을 받고, 작용하는 전단변형률이 지반의 한계전단변형률 보다 작은 경우에는 진동수가 높은 조건에서도 간극수압이 발생하지 않음을 알았다. 한편 전단변형률이 한계전단변형률 보다 상당히 큰 조건에서는 진동수가 증가함에 따라 간극수압이 크게 증가하는 추세를 보였다. 이러한 결과는 실트를 포함한 모래시료에 대한 기존 시험 연구(Vucetic과 Dobry, 1988; Erten과 Maher, 1995)에서 밝혀진 특성과 유사한 것으로 나타났다.

- (2) 본 논문에서 조사한 석탄회 함유율 범위(10%~30%)의 시료에서 전단변형률이 약 0.1%보다 작고 한계전단변형률에 가까운 경우에는 순수 모래시료와 비교하여 석탄회 함유시료에 간극수압이 더 크게 발생하였다. 반면에, 전단변형률이 큰 경우에는 순수 모래시료에서 간극수압이 더 크게 발생하는 추세를 보였다. 즉, 액상화에 의한 간극수압비가 100%가 되는 변형률은 순수모래시료의 경우가 혼합시료의 경우보다 작은 추세를 보였다.
- (3) 반복 전단에 따른 간극수압의 발생량은 전반적으로 석탄회 함유율이 증가할수록 커지는 경향을 보였다. 이러한 경향과 (2)의 결과를 근거로 한계전단변형률은 석탄회 함유율이 커질수록 작아져 액상화 가능성이 커지는 것으로 나타났다.
- (4) 결과적으로 해안이나 하천에 인접한 한계지 개발에 있어서 사질토에 석탄회를 혼합 매립하여 지반을 조성하는 경우에 액상화에 대해서 불안정한 지반이 될 가능성이 있는 것으로 판단되었다.

## 참 고 문 헌

1. 장석환(2000), "석탄회 매립지반의 액상화 가능성 평가에 관한 연구", 공주대학교 대학원 석사학위 논문.
2. 장학순(1999), "석탄회가 혼합된 화강토에 대한 성토재료로서의 공학적 특성에 관한 연구", 공주대학교 대학원 석사학위 논문.
3. 정경순(2001), "변형률제어 시험법을 이용한 석탄회 혼합 모래시료의 액상화 평가", 공주대학교 대학원 석사학위 논문.
4. 황대진(1993), "실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화 강도에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제13권, 제2호, pp.243~252.
5. Erten, D. and Maher, M. H.(1995), "Cyclic Undrained Behavior of Silty Sand", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.14, pp.115~123.
6. Seed, G. B. and Idriss, I. M.(1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of SMFD, ASCE, Vol.107, No.SM9, pp.1249~1274.
7. Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, I.(1983), "Evaluation Liquefaction Potential Using Field Performance Data", Journal of Geotech. Engrg., ASCE, Vol.109, No.4, pp.458~482.
8. Vucetic, M. and Dobry, R.(1988), "Cyclic Triaxial Strain-Controlled Testing of Liquefiable Sands", Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM SPT 977, pp.475~485.

(접수일자 2001. 6. 29)