

## 입도분포가 액상화 저항강도에 미치는 영향에 관한 실험적 연구 Experimental Study on the Effect of Particle Size Distribution of Soil to the Liquefaction Resistance Strength

최문규<sup>1)</sup>, Mun-Gyu Choi, 서경범<sup>2)</sup>, Kyung-Bum Seo, 박성용<sup>3)</sup> Seong-Yong Park, 김수일<sup>4)</sup>, Soo-Il Kim

<sup>1)</sup> 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

<sup>2)</sup> 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

<sup>3)</sup> 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

<sup>4)</sup> 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

**SYNOPSIS** : The effects of mean particle size and uniformity coefficient of dredged soils to the liquefaction resistance strength and dynamic characteristics are experimentally studied in this paper. Representative 4 mean particle sizes and 3 uniformity coefficients were selected and 12 representative particle size distribution curves which have different mean particle sizes and uniformity coefficients, were artificially manufactured using the real dredged river soil. Cyclic triaxial tests and torsional shear tests were carried out to analyze the effect of mean particle size and uniformity coefficient to the liquefaction resistance strength and dynamic characteristics of soils.

**Key words** : liquefaction resistance strength, particle size distribution curve, cyclic triaxial test, torsional shear test, shear modulus, damping ratio

### 1. 서 론

본 연구에서는 입도분포가 액상화 저항강도 및 동적물성치에 미치는 영향을 실험적으로 검증하였다. 우리나라 준설패립토의 입도분포 조사를 통해 준설패립토의 보편적인 평균입경 4가지와 균등계수 3가지를 선정하였고 평균입경과 균등계수를 각각 달리한 총 12종류의 대표적 준설패립토의 입도분포를 선정, 시료를 제작하였다. 제작된 시료를 이용하여 진동삼축시험을 수행하여 평균입경과 균등계수가 액상화 저항강도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 공진주시험을 수행하여 입도분포가 동적물성치에 미치는 영향도 분석하였다.

### 2. 준설패립토의 입도분포 조사 및 대상시료 선정

총 21개소에서 사용된 우리나라 준설패립토의 입도분포를 조사하고 이를 주문진 표준사의 입도분포 및 과거 액상화 발생자료를 근거로 작성된 입도분포에 따른 액상화 가능성 영역(Port and Harbour Research Institute, 1997)과 함께 나타내면 그림 1과 같다. 그림 1에 나타난 것처럼 국내 준설패립토의 대부분은 액상화 발생 가능성이 매우 높은 구역(I구역) 및 높은 구역(II구역)에 속하고 있으며 평균

입경은 약 0.09~2.50mm, 균등계수는 약 4~30 범위의 다양한 분포를 나타내고 있다. 그러나 국내 내진설계 기준에서는 200번 체를 통과한 세립분 함유량이 35% 이상일 경우 액상화 발생 가능성이 없는 것으로 판단하여 액상화 평가를 생략하고 있기 때문에 시험대상 시료의 평균입경을 0.074mm 이상의 범위로 제한하였다.

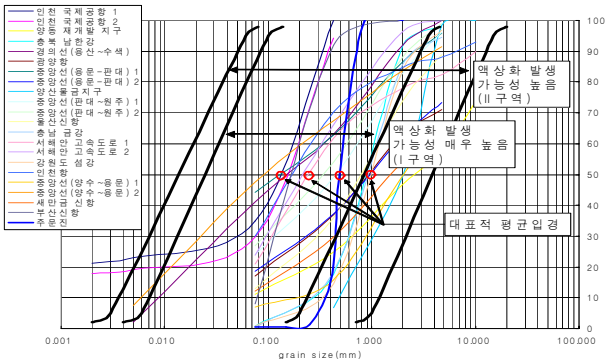


그림 1. 준설패립토의 입도분포

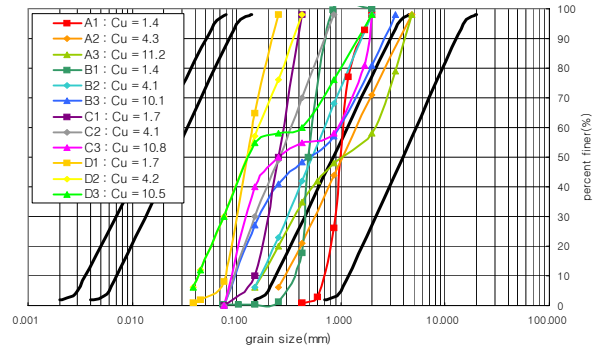


그림 2. 대상시료의 입도분포

그림 1에서 보는 바와 같이 조사된 준설패립토의 평균입경은 0.09mm~2.45mm 범위에 있으므로 1.00mm, 0.25mm, 0.12mm의 3가지 평균입경을 대표적인 준설패립토의 평균입경으로 선정하였고 주문진 표준사와의 비교를 위해 주문진 표준사의 평균입경인 0.49mm를 대표적 평균입경에 포함하였다. 조사된 준설패립토의 균등계수는 4~30 범위의 비교적 양입도 분포를 나타내고 있으며 4.0~4.5 및 10.0~11.0 범위에서 집중되는 경향을 보이고 있다. 따라서 약 4.1과 10.5를 대표적인 준설패립토의 균등계수로 선정하였고 빈입도 시료인 주문진 표준사의 균등계수 1.4 역시 대표적인 준설패립토의 균등계수에 포함시켰다.

선정된 1.00mm, 0.49mm, 0.25mm, 0.12mm의 4종류의 평균입경과 약 1.4, 4.1, 10.5인 3종류의 균등계수를 조합하여 평균입경별 균등계수를 달리한 총 12가지 시료를 제작하였다. 언급의 편의상 입도분포가 큰 순서부터 A~D, 균등계수가 작은 순서부터 1~3의 명칭을 부여하였다. 평균입경과 균등계수에 따른 각 시료의 입도분포는 그림 2와 같다.

### 3. 시험결과 및 분석

#### 3.1 기본물성시험

기본적인 공학적 성질을 규명하기 위해 최대 및 최소 건조단위중량시험 및 비중시험을 실시하였으며 그 결과는 그림 3 및 4와 같다. 시료의 평균입경과 균등계수가 증가함에 따라 최대 및 최소 건조단위중량은 증가하고 비중값은 감소하는 보편적인 경향을 확인할 수 있다.

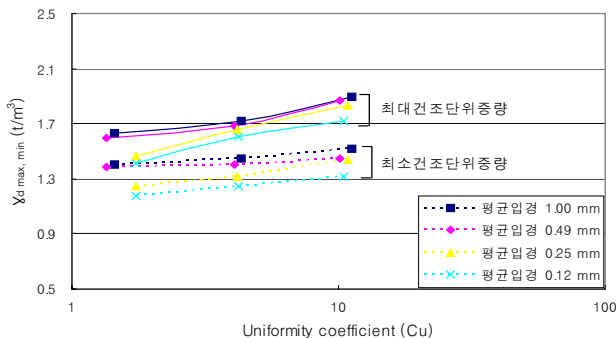


그림 3. 최소 및 최대 건조단위중량시험

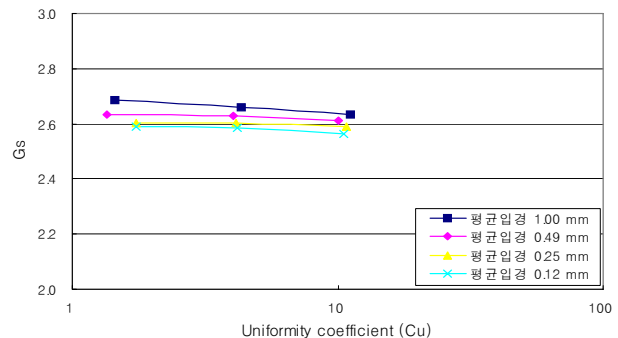


그림 4. 비중시험

### 3.2 진동삼축시험

제작된 12종류 시료의 액상화 저항강도를 산정하기 위해 정현파 하중을 이용한 진동삼축시험을 수행하였다. 시험조건으로는 보편적 현장조건인 상대밀도 50%, 60%, 70%와 초기유효구속압 100kPa을 사용하였고 각 시료에 대한 진동삼축시험시 축하중의 크기를 변화시키면서 액상화 발생 횟수와 액상화 저항강도 사이의 관계를 나타내었다. 국내 내진설계기준에서 규정한 지진규모 6.5를 고려한 등가재하반복횟수 10회에 대한 액상화 저항강도를 나타내면 표 1과 같다.

표 1. 시료별 액상화 저항강도

시료명	평균입경 (mm)	균등 계수	액상화 저항능력비		
			Dr = 50%	Dr = 60%	Dr = 70%
A1	1.00	1.4	0.189	0.196	0.231
A2		4.3	0.208	0.217	0.240
A3		11.2	0.221	0.244	0.252
B1(주문진 표준사)	0.49	1.4	0.156	0.177	0.211
B2		4.1	0.188	0.203	0.234
B3		10.1	0.205	0.230	0.240
C1	0.25	1.7	0.181	0.190	0.214
C2		4.1	0.188	0.205	0.228
C3		10.8	0.190	0.210	0.231
D1(Fines Content : 8%)	0.12	1.7	0.183	0.197	0.214
D2(Fines Content : 30%)		4.2	0.207	0.218	0.232
D3(Fines Content : 30%)		10.5	0.215	0.232	0.240

#### 3.2.1 평균입경 변화에 따른 액상화 저항강도의 차이

주어진 상대밀도 상태에서 평균입경에 따른 액상화 저항강도를 나타내면 그림 5 및 표 2와 같다. 그림 5를 살펴보면 평균입경이 동일한 경우 균등계수가 증가함에 따라 액상화 저항강도는 증가하고 있으며 평균입경이 0.5~0.6mm일 경우 최소 액상화 저항강도를 갖는 것으로 나타나고 있다. 표 2에 나타난 각 상대밀도에서의 평균입경에 따른 최소 액상화 저항강도는 상대밀도가 증가함에 따라 최소 액상화 저항강도는 최대 35.3%까지 증가하고 있다. 상대밀도가 높은 경우에는 평균입경 변화에 따라 최소 액상화 저항강도는 9.5%의 변화를 보였으나 상대밀도가 낮은 경우에는 평균입경 변화에 따라 최소 액상화 저항강도는 21.1%의 변화를 보여 상대밀도가 낮은 경우 평균입경 변화가 액상화 저항강도에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다. 또한 Ishihara가 제시한 액상화 발생 가능성 구역도에서 평균입경이 1.00mm로 액상화 발생가능성이 높은 범위(II구역)에 속하는 시료는 액상화 발생가능성이 매우 높은 구역(I구역)내에 있는 평균입경 0.49mm, 0.25mm, 0.12mm인 시료보다 액상화 저항능력비가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 과거 액상화 발생자료를 근거로 작성된 입도분포에 따른 액상화 발생 가능성 영역(Port and Harbour Research Institute, 1997)의 기준이 합리적임을 나타낸다.

표 2. 평균입경에 따른 최소 액상화 저항강도

평균입경 (mm)	최소 액상화 저항강도			(최대값-최소값)/최소값
	Dr = 50%	Dr = 60%	Dr = 70%	
1.00	0.189	0.196	0.231	22.1%
0.49	0.156	0.177	0.211	35.3%
0.25	0.181	0.190	0.214	18.2%
0.12	0.183	0.197	0.214	16.9%
(최대값-최소값)/최소값	21.1%	11.3%	9.5%	

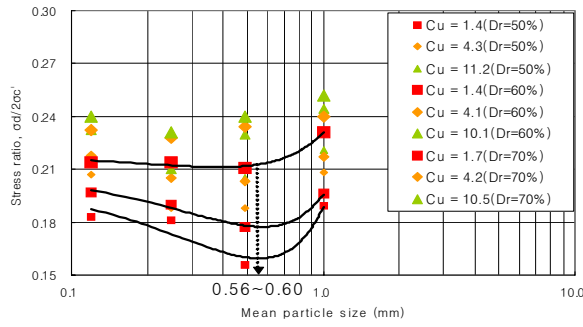
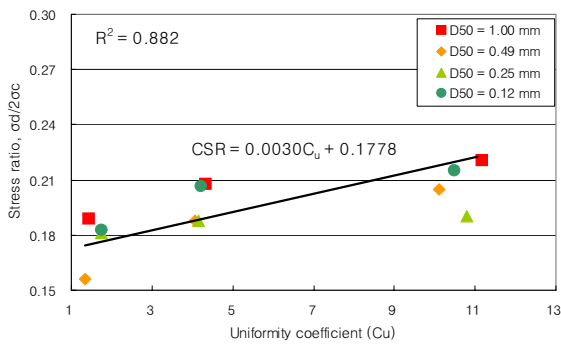


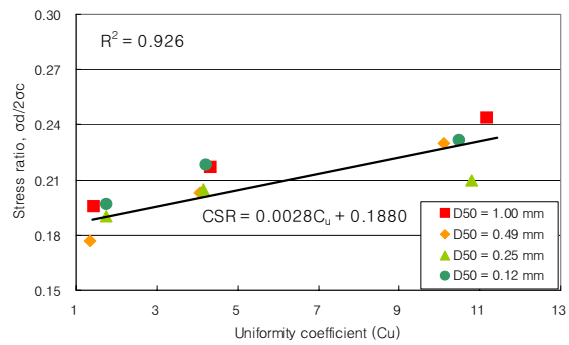
그림 5. 평균입경에 따른 저항강도

### 3.2.2 균등계수 변화에 따른 액상화 저항강도의 차이

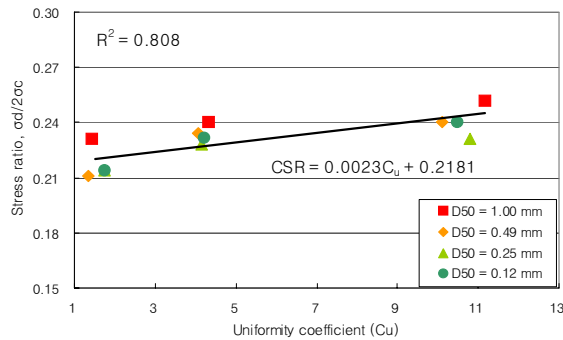
주어진 상대밀도에서 균등계수에 따른 액상화 저항강도를 나타내면 그림 6 및 표 3과 같다. 그림 6에 나타난 것처럼 균등계수가 증가함에 따라 액상화 저항강도는 증가하고 있으며 표 3에 나타난 것처럼 상대밀도가 높은 경우에는 균등계수가 증가함에 따라 최소 액상화 저항강도는 최대 19.4%까지 증가하고 있으나 상대밀도가 낮은 경우에는 그 증가율이 41.7%로 상대밀도가 낮은 경우에 균등계수 변화가 액상화 저항강도에 미치는 영향이 크을 알 수 있다.



(a) 상대밀도 50%



(b) 상대밀도 60%



(c) 상대밀도 70%

그림 6. 균등계수에 따른 액상화 저항강도

표 3. 균등계수에 따른 최소 액상화 저항강도

균등계수	최소 액상화 저항강도비			(최대값-최소값)/최소값
	Dr = 50%	Dr = 60%	Dr = 70%	
1.4	0.156	0.177	0.211	35.3%
4.1	0.188	0.203	0.228	21.3%
10.5	0.221	0.244	0.252	14.0%
(최대값-최소값)/최소값	41.7%	37.9%	19.4%	

### 3.3 공진주시험

본 연구에서는 시료의 입도분포 특성에 따른 지반의 동적 특성치인 최대전단탄성계수 및 전단탄성계수와 감쇠비의 변화특성을 파악하기 위해 공진주시험을 실시하였다. 각 시료의 상대밀도는 60%이고 유효구속압은 100kPa이며 시료는 습윤다짐법으로 제작하였다.

Hardin(1978)은 최대전단탄성계수를 식 (1)과 같이 제안하였다. 식 (1)을 이용하여 산정된 최대전단탄성계수와 본 연구에서 수행한 공진주시험에 의해 산정된 최대전단탄성계수를 나타내면 그림 7과 같다. 그림 7에 나타난 것처럼 식 (1)에 의해 산정된 값과 공진주시험에 의한 값은 다소의 차이는 있으나 시료의 간극비가 증가함에 따라 최대전단탄성계수가 감소하는 동일한 경향을 보인다. 시험에 의해 산정된 최대전단탄성계수의 값을 시료의 균등계수에 따라 도시하면 그림 8과 같다. 그림 8에 나타난 것처럼 균등계수가 증가함에 따라 최대전단탄성계수에 미치는 균등계수의 영향은 감소하였다.

$$G_{max} = A \cdot F(e) \cdot OCR^k \cdot P_a^{1-n} \cdot (\sigma'_o)^n \quad (1)$$

여기서,  $A =$  계수 = 400,  $F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2}$ ,  $OCR =$  과압밀비  
 $k =$  소성지수에 따른 계수,  $P_a =$  대기압  
 $n = \log G_{max} - \log \sigma'_o$  그래프 상의 경사,  $\sigma'_o =$  평균구속압

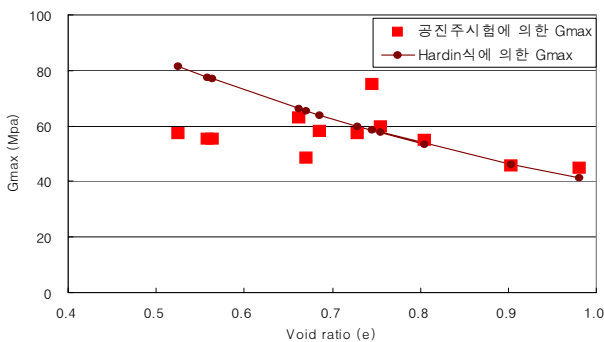


그림 7. 간극비 변화에 따른 최대전단탄성계수

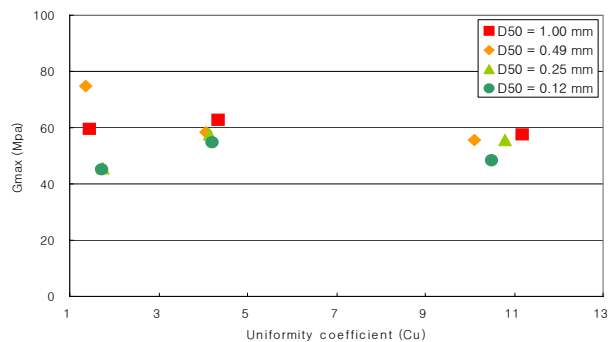
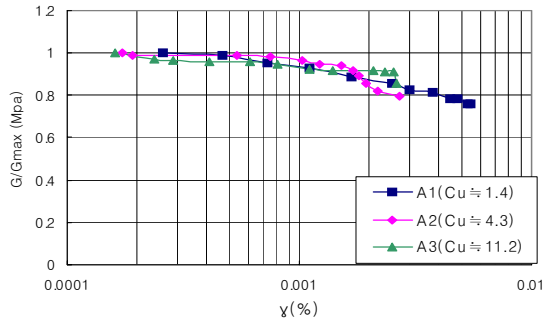
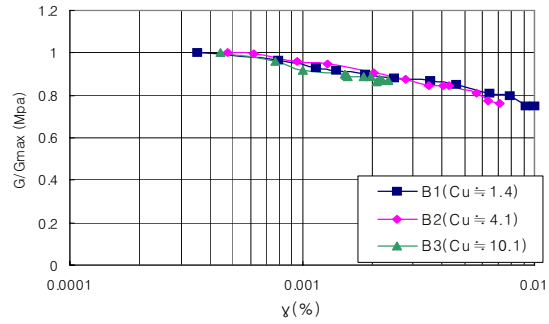


그림 8. 균등계수에 따른 최대전단탄성계수

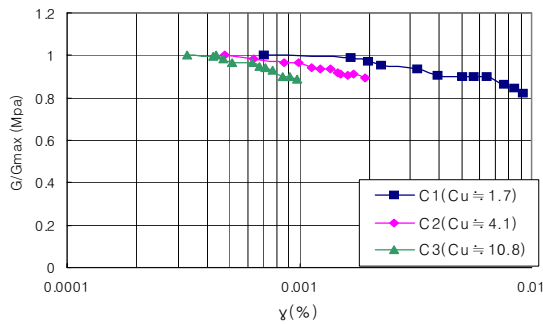
평균입경이 동일한 경우 각 균등계수별 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수의 변화를 살펴보면 그림 9와 같다. 그림 9의 (a)~(d) 및 표 4에 나타난 바와 같이 전단변형률에 따른 정규화 전단탄성계수 그래프를 살펴보면 빈입도의 시료는 양입도의 시료에 비해 전단변형률에 따른 전단탄성계수의 감소폭이 최대 전단탄성계수의 0.14배 차이를 보이는 것으로 나타났다.



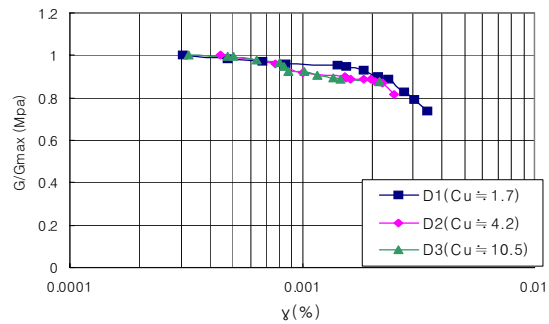
(a) 평균입경 1.00mm



(b) 평균입경 0.49mm



(c) 평균입경 0.25mm



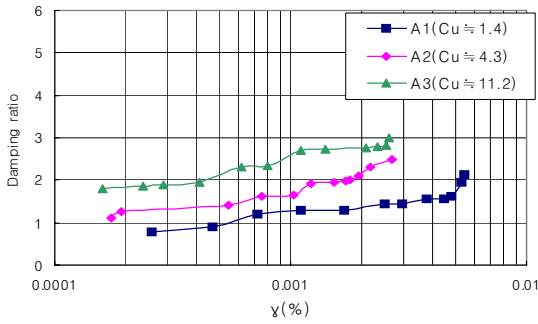
(d) 평균입경 0.12mm

그림 9. 정규화 전단탄성계수의 변화

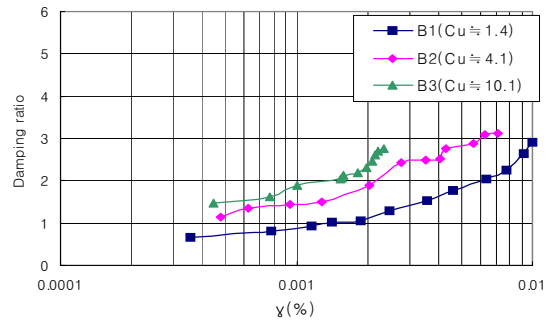
전단변형률에 따른 감쇠비의 변화를 살펴보면 그림 10과 같다. 그림 10의 (a)~(d)에서 나타난 바와 같이 평균입경이 동일한 경우 빈입도의 시료에 비해 양입도의 시료일수록 감쇠비가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 전단변형률 0.001%일 경우를 기준으로 한 각 시료의 감쇠비를 나타내면 표 4에 나타내었다. 표 4에 나타난 것처럼 균등계수가 약 10.5인 양입도 시료는 균등계수가 약 1.4인 빈입도 시료보다 감쇠비가 약 86~167% 이상으로 크게 증가된 값을 보이고 있다.

표 4. 최대전단변형률, 전단탄성계수의 변화 및 변형률 0.001%시의 감쇠비

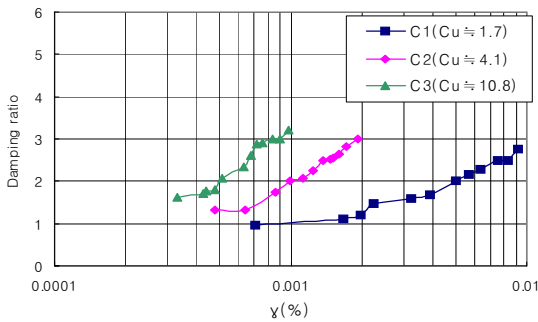
시료명	평균입경 (mm)	균등계수	$G_{max}$ (Mpa)	Hardin식에 의한 $G_{max}$ (Mpa)	$\gamma_{max}$	$\gamma_{max}$ 시의 $G/G_{max}$	G의 감소폭 (1- $G/G_{max}$ )	전단변형률 0.001%시의 감쇠비
A1	1.00	1.4	59.75	57.7	0.0055	0.76	0.24	1.26
A2		4.3	62.90	66.4	0.0027	0.79	0.21	1.50
A3		11.2	57.45	81.5	0.0026	0.86	0.14	2.38
B1	0.49	1.4	75.00	58.5	0.0100	0.75	0.25	0.88
B2		4.1	58.32	64.0	0.0071	0.76	0.24	1.41
B3		10.1	55.45	77.7	0.0023	0.87	0.13	1.92
C1	0.25	1.7	45.66	46.2	0.0092	0.82	0.18	1.20
C2		4.1	57.52	60.0	0.0019	0.88	0.12	2.00
C3		10.8	55.57	77.0	0.0010	0.89	0.11	3.20
D1	0.12	1.7	45.15	41.4	0.0034	0.74	0.26	1.40
D2		4.2	54.87	53.5	0.0025	0.82	0.18	1.75
D3		10.5	48.46	65.5	0.0021	0.88	0.12	2.60



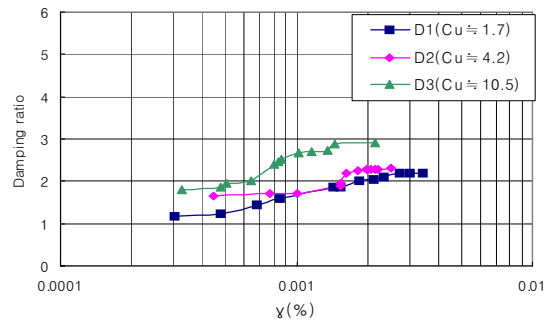
(a) 평균입경 1.00mm



(b) 평균입경 0.49mm



(c) 평균입경 0.25mm



(d) 평균입경 0.12mm

그림 10. 감쇠비의 변화

이와 같은 사실을 종합해 볼 때 평균입경이 동일한 경우 양입도 시료는 빈입도의 시료에 비해 전단변형률에 따른 전단탄성계수의 변화폭이 감소하였고 감쇠비는 증가함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 입도분포가 액상화 저항강도 및 동적물성치의 변화특성에 미치는 영향을 실험을 통해 분석하였다. 이러한 과정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평균입경이 동일한 경우 양입도의 시료일수록 액상화 저항강도가 증가하는 현상을 확인할 수 있었다. 이는 양입도의 흙에서 작은 흩입자들이 큰 입자들 사이의 간극을 채움으로써 배수상태에서는 작은 체적변화를, 비배수 상태에서는 다일러턴시 현상으로 낮은 간극수압을 유도하기 때문이라고 판단된다. 따라서 준설패립시에 액상화 발생가능성이 상대적으로 큰 빈입도의 흙만을 이용하기보다 입도가 다른 흩들을 섞어 양입도의 상태로 이용하는 것이 액상화 저항강도의 측면에서 바람직한 것으로 판단된다.

2. 액상화 발생가능성이 있는 상대밀도의 범위 내에서는 상대밀도가 증가할수록 액상화 저항강도가 증가하였으며 본 연구에서 사용된 시료의 경우 평균입경이 0.5~0.6mm의 범위에서 최소 액상화 저항강도를 나타냈다. 동일한 상대밀도인 경우 액상화 저항강도는 평균입경의 변화에 따라 최대 21.1%의 차이를, 균등계수의 변화에 따라 최대 41.7%의 차이를 나타냈으며 상대밀도가 증가함에 따라 그 차이는 감소하였다.

3. Ishihara가 제시한 액상화 발생 가능성 구역도에서 액상화 발생가능성이 높은 범위(Ⅱ구역)에 속하는 시료는 액상화 발생가능성이 매우 높은 범위(Ⅰ구역)내에 있는 시료보다 큰 액상화 저항강도를 나타냈다. 이를 통해 과거 액상화 발생자료를 근거로 작성된 입도분포에 따른 액상화 가능성 영역(Port and Harbour Research Institute, 1997)의 기준이 합리적임을 부분적으로 확인할 수 있었다.

4. 간극비가 증가함에 따라 최대전단탄성계수는 감소하였으며 평균입경이 동일한 경우 양입도의 시료는 빈입도의 시료에 비해 전단변형률에 따른 전단탄성계수의 변화폭이 감소하였고 감쇠비는 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금과 교육부를 통한 두뇌한국 21 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

1. Gibbs, H. J. and W.G.Holtz (1957), "Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetrating Testing," *Proc. 4th Inter. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* (London), Vol. I, pp. 35.
2. Hardin, B. O. (1978), " The Nature of Stress-Strain Behavior of Soils," *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 1, No. 1, pp. 16~23.
3. Port and Harbour Research Institute (1997), *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, A. A. Balkema.