

Porous Plate를 이용한 개선된 레이닝 시스템

Improved Raining System Using Porous Plate

최 성 근 ¹	Choi, Sung-Kun	이 문 주 ²	Lee, Moon-Joo
추 현 옥 ³	Choo, Hyun-Wook	홍 성 진 ⁴	Hong, Sung-Jin
이 우 진 ⁵	Lee, Woo-Jin		

Abstract

Raining method has been widely used for preparing sand specimen because of its ability to reconstitute the homogeneous specimen with desired relative density and its reliability established by the numerous experiments on diverse influential factors. In conventional raining methods, adjustment of relative density is achieved by controlling the shutter porosity and the whole system is required to be re-adjusted to achieve the target relative density when the granular characteristics are changed. It is also observed from conventional methods that certain degrees of spatial variation in density exist and the limited range of relative density is reproduced. In this paper, raining system with porous plate is proposed. It is shown that the wide range of relative density can be achieved by controlling falling height only. This enhanced system is able to obviate the subtle control of shutter porosity and minimize the effect of falling distance, which in turn ensures the homogeneity of the specimen, especially for low relative density.

요 지

낙사법은 요구되는 상대밀도로 반복적으로 시료 조성이 가능하고 다양한 영향요인에 대한 평가를 통해 조성되는 시료의 신뢰성이 확보되었다는 장점을 가지고 있어 챔버 시험을 위한 사질토 시료조성 방법으로 널리 쓰이고 있다. 그러나 개폐율을 조절하여 상대밀도를 조절하는 기존의 방법으로 조성된 시료는 상하부간 상대밀도차가 존재하고, 개폐율 제어만으로 다양한 상대밀도를 구현할 수 없는 단점이 있으며, 입자 특성에 따라 시스템을 재조정하여 상대밀도 조건을 찾아야 하는 단점이 있다. 본 논문에서는 개폐율보다는 낙하고 조절에 의해 다양한 상대밀도의 시료를 조성할 수 있도록 porous plate를 사용한 레이닝 시스템을 제안하여 시험하였다. 그 결과 기존의 문제점인 개폐율의 세분화와 낙하거리의 영향을 최소화 할 수 있었으며 낮은 상대밀도 조성시 문제되었던 시료 상하부간 비균질성을 개선하였다.

Keywords : Falling height, Porous plate, Shutter porosity, Raining method, Relative density

1. 서 론

사질토 지반의 비교란 시료 채취를 위해 사용되는 화

학적 고결방법(chemical impregnation method)이나 동결방법(freezing method)은 기술적으로 어렵고 경제적 비용이 크게 발생하므로, chamber test와 같은 대형 실

1 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)
 2 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)
 3 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)
 4 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ.)
 5 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)
 * 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

험을 위한 비교란 시료의 채취는 현실적으로 불가능하다. 따라서 다양한 현장 조건(상대밀도, 응력상태, 흙의 구조 등)을 적절히 반영할 수 있는 재성형 시료를 조성하여야 하며 이러한 관점에서 레이닝(sand raining, 낙사)에 의한 시료조성은 균질한 상대밀도의 시료를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 퇴적에 의한 현장 흙 구조의 형성 과정을 유사하게 모사할 수 있기 때문에 널리 사용되고 있다(Mori 등 1977; Rad and Clough 1982; Rad and Tumay 1987). 레이닝은 소형 삼축시료의 조성에서부터 실내 현장모형시험을 위한 대형 chamber시료의 조성에 이르기까지 상대밀도가 고른 비교적 균질한 시료를 손쉽게 조성할 수 있어 많은 연구에서 이용되고 있다.

레이닝에 의한 시료조성 방법이 Kolbuszewski(1948a, b)에 의해 체계화된 이후, Jacobsen(1976), Kildalen and Stenhamar(1977), Tumay 등(1979), Gilbert(1984), 그리고 Rad and Tumay(1986) 등이 낙하고와 개폐율에 따른 상대밀도의 변화에 대해 연구하였다. 또한 Rad and Tumay(1987)는 주 영향요소인 낙하고와 개폐율 외에, 낙하거리, 개폐구멍 유형, 그리고 분산체의 치수 및 개수 등의 영향 요인에 관한 연구를 수행하였다.

레이닝 시스템은 모래의 낙하고가 변하지 않도록 설계하는 것이 중요하며, 이를 위해 Rad and Tumay(1987), Brandon and Clough(1991), Puppala 등(1995)의 레이닝 시스템에서는 분산체와 storage tube의 모래덮개를 네 방향의 줄로 연결하는 방법으로 레이닝이 진행되어도 모래의 낙하고가 일정하게 유지되도록 하였다. 그러나 이 같은 방법은 단지 개폐율의 조절을 통하여 원하는 상대밀도를 얻을 수 있으므로, 상대밀도와 개폐율의 상관관계를 얻기 위한 기본 실험을 통해 시스템의 재수정이 필요하다. 또한 분산체를 통과한 시료의 낙하고만 일

정하게 조절할 뿐, 개폐판부터 분산체까지의 낙하거리는 시료 조성 시 감소하므로 시스템에 따라 입자의 하강 속도가 종단속도에 도달하지 못하는 경우가 발생하여 상하부 조성시료의 상대밀도 차를 발생시키는 요인이 되기도 한다.

따라서 본 논문에서는 Rad and Tumay(1987), Brandon and Clough(1991), 그리고 Puppala 등(1995)이 소개한 기존 레이닝 시스템의 문제점을 살펴보고, 개선된 챔버 레이닝 시스템을 제안하고자 한다. 개선된 시스템을 이용하여 조성된 대형 모래시료의 수평, 수직방향 균질성을 평가하고, 다양한 상대밀도의 시료를 낙하고 조절만으로 조성할 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

2. 레이닝 시스템에서 상대밀도에 영향을 주는 요인

레이닝에 의해 조성된 모래시료의 상대밀도에 가장 큰 영향을 주는 요인은 전술한 바와 같이 개폐율과 낙하고이다(Kolbuszewski 1948; Jacobsen 1976; Kildalen and Stenhamar 1977; Tumay 등 1979; Gilbert 1984; Rad and Tumay 1986). Rad and Tumay(1987)는 개폐율과 낙하고 뿐만 아니라 표 1과 같은 다양한 요인에 대한 영향 정도를 검토하였다.

개폐율은 storage tube의 하부 면적과 저장된 모래가 낙사되는 개폐구멍의 면적비율이며, 침전도는 단위시간당 단위면적에 낙하하는 모래의 무게이다. 따라서 개폐율이 클수록 침전도 또한 증가하며, 낙하한 모래의 상대밀도는 개폐율과 반비례하는 경향을 보인다. 또한 개폐율과 침전도는 개폐구멍의 크기와 정렬유형에 의해 영향을 받으며, 개폐구멍이 작고 균등하게 정렬될수록 모래의 분산효과가 증가되어 높은 상대밀도의 시료가 조

표 1. Raining 시스템에서 상대밀도에 영향을 주는 요인(Rad and Tumay, 1987)

영향요인	기호	단위	영향정도
개폐율(Shutter porosity)	SP	%	A
침전도(Deposition intensity)	DI	g/cm ² /s	A
개폐구멍유형(Shutter-hole pattern)	SHP	-	B
개폐판 작용 상재압(Vertical stress on shutter)	VSS	kPa	C
낙하거리(Falling distance)	FD	cm	C
낙하고(Falling height)	FH	cm	A
분산체 공칭치수(Diffuser-sieve opening)	DSO	mm	B
체 개수(No. diffuser-sieves)	NDS	-	C
분산체 간격(Distance between diffuser-sieves)	DD	cm	C

* 영향정도 : A>B>C

성된다.

낙하거리는 storage tube의 개폐판과 분산체 사이의 거리로써, Rad and Tumay(1987)의 실험에 의하면 낙하 거리에 관계없이 동일한 상대밀도의 시료가 조성되었다. 그러나 Rad and Tumay(1987)의 실험에서는 비교적 높은 상대밀도의 모래시료만을 조성하였으므로, 본 연구에서는 낮은 상대밀도의 모래시료 조성 시 낙하거리의 영향에 대해서도 검토하였다.

낙하고는 분산체를 통과한 모래의 낙하높이로써, 낙하거리와 더불어 입자의 종단속도에 영향을 주어서 상대밀도를 결정하는 중요 요소이다(Kildalen and Stenhamar 1977; Rad and Tumay 1987). Rad and Tumay(1987)는 그림 1과 같은 결과로부터 분산체를 통과한 모래의 낙하속도가 일정해지는 종단낙하고 이상에서는 낙하고에 관계없이 동일한 상대밀도의 시료가 조성된다고 주장하였다. 모래의 종단낙하고는 초기 낙하속도, 낙하거리, 분산체 간격, 그리고 분산체 크기 등에 의해서도 영향을 받는다. 또한 개폐판에 작용하는 상재하중도 모래의 초기 낙하속도에 영향을 줄 수 있으나, 상대밀도에 끼치는 영향은 미미하다.

레이닝 시스템은 모래 분산을 효율적으로 하기 위해 2개 이상의 분산체를 45°로 어긋나게 배치한다. 일반적으로 체의 공칭치수가 작을수록 모래가 효과적으로 분산되며, 더 큰 상대밀도의 시료가 조성된다. 체의 개수가 많을수록 모래의 분산효과는 더 뛰어난 반면, 체를 통과한 모래의 낙하속도는 감소하기 때문에 체의 개수는 시료의 상대밀도에 끼치는 영향이 적다(Rad and Tumay, 1987). 또한 2개 이상의 체가 사용될 경우, 분산체의 간격도 상대밀도에 미소한 영향을 줄 수 있다.

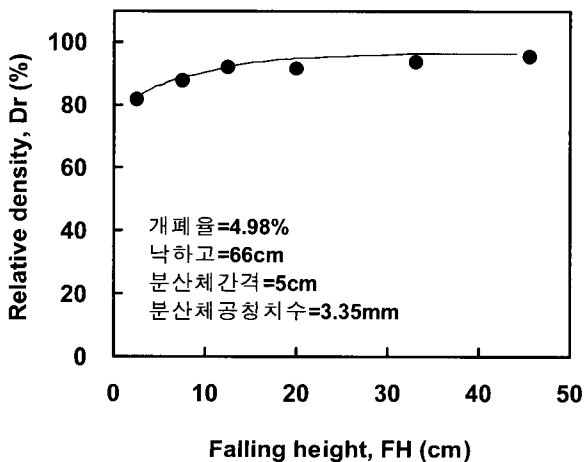


그림 1. 낙하고에 따른 상대밀도 영향(Rad and Tumay, 1987)

3. Porous plate를 이용한 레이닝 시스템의 개선

3.1 기존 레이닝 시스템의 특성

Rad and Tumay(1987), Brandon and Clough(1991), 그리고 Puppala 등(1995)에 의해 제안된 레이닝 시스템은 낙하고를 종단낙하고 이상으로 일정하게 유지하고 개폐율을 조정하여 원하는 상대밀도의 시료를 조성하는 방법이다. 그러나 조성 시료의 크기가 대형화되고 적용하는 시험장비가 다양화됨에 따라 다음과 같은 문제점이 발견되었다.

3.1.1 연직방향 상대밀도 차이

Rad and Tumay(1987)의 실험결과에 의하면, 직경 30cm이고 높이 45cm인 레이닝 시스템으로 조성된 시료의 연직방향 상대밀도 오차가 2%~5%정도 발생되었다. 또한, Puppala 등(1995)의 레이닝 시스템(직경 56cm, 높이 82cm)으로 조성한 중간조밀~조밀한 시료의 경우에도 상·하부 상대밀도차가 5~7%정도 발생하였다(그림 2). 이러한 오차는 조성 상대밀도가 낮고, 시료가 대형화 될수록 증가하는 경향을 보이며, 오차발생 요인은 개폐율과 낙하거리, 그리고 체 공칭치수 등으로 판단된다. 즉, 개폐율에 따라 침전도 및 종단속도 발생을 위한 조건이 변화하며 이를 보정하기 위하여 낙하거리 및 체 공칭치수를 조정하여야 한다. 따라서 Rad and Tumay(1987)가 제안한 방법은 높은 상대밀도의 시료 조성 시 적용은 양호하나, 상대적으로 낮은 상대밀도 조건에서는 오차 발생 가능성이 큰 것으로 판단된다.

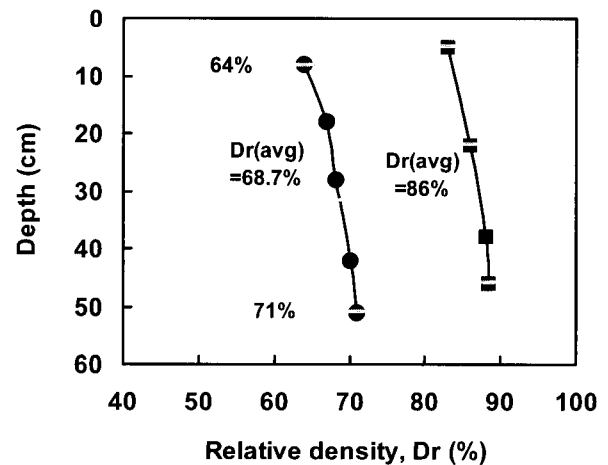


그림 2. 시료의 연직방향 상대밀도 변화(Puppala 등, 1995)

3.1.2 상대밀도 및 대상 시료에 대한 적용성

레이닝 시스템은 낙하하는 입자가 종단속도 조건을 만족시키는 것을 기본으로 가정하고 있으며, 상대밀도는 단지 개폐율에 따라 조정되는 것으로 설계되어 있다. 그러나 시스템의 개폐율 설계는 세분화 정도에 한계가 있기 때문에, 조성될 수 있는 시료의 상대밀도 조건은 제약이 발생한다. 또한 동일한 시스템을 이용하여 입자의 크기나 형태, 분포 등이 다른 시료를 조성할 경우에도 가장 기본적인 조건인 종단속도 조건을 만족시키지 못하는 현상이 나타날 수 있다. 일반적으로 입자의 종단속도는 입자가 클수록 증가하며, 종단속도 발현을 위한 낙하거리 또한 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 시스템에 설계된 크기 이상의 모래 시료를 사용할 경우, 이에 따른 제약이 발생할 수 있다.

3.2 레이닝 시스템의 개선

3.2.1 개선 원리

3.1절에서 언급한 바와 같이, 상대밀도 조성을 위해 사용되는 개폐율 조절법은 시험장비가 대형화되고 시험시료가 다양해질수록 적용성에 문제가 발생한다. 따라서 개선된 레이닝 시스템은 개폐율이 아닌 낙하고 조절법을 사용하였다. 낙하고 조절법의 기본 원리는 낙하하는 입자의 속도가 반드시 종단속도 이상을 유지할 필요가 없으며, 낙하거리 및 낙하고를 시험 과정에서 일정하게 유지하여 원하는 상대밀도의 시료를 조성한다는 것이다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 상부 storage tube를 레이닝 진행에 따라 퇴적되는 시료 높이만큼 상승시켜야 하는데, 이는 기존 시스템에 비해 복잡한 설비를 요한다. porous plate는 분산체 상부에 설치되는 다공판으로

기존 시스템에 porous plate 개념을 도입하면 storage tube에서 낙하하는 입자의 속도를 소멸시켜 porous plate부터 다시 자유낙하 조건을 제공한다. 따라서 시험 과정에 걸쳐 낙하고 및 낙하거리가 일정하며, 하강하는 입자의 속도 또한 일정하게 유지된다. 이때 낙하거리는 기존의 시스템에서의 낙하거리와는 달리 porous plate와 분산체 사이의 거리가 된다. 표 2는 기존 시스템과 porous plate를 이용한 시스템의 특성을 비교한 것이다.

3.2.2 레이닝 시스템

모래 시료를 조성하기 위해 개발된 본 연구의 챔버 레이닝 시스템은 그림 3과 같으며, Sweeney and Clough (1990)와 Puppala 등(1995)에 의한 레이닝 시스템을 기

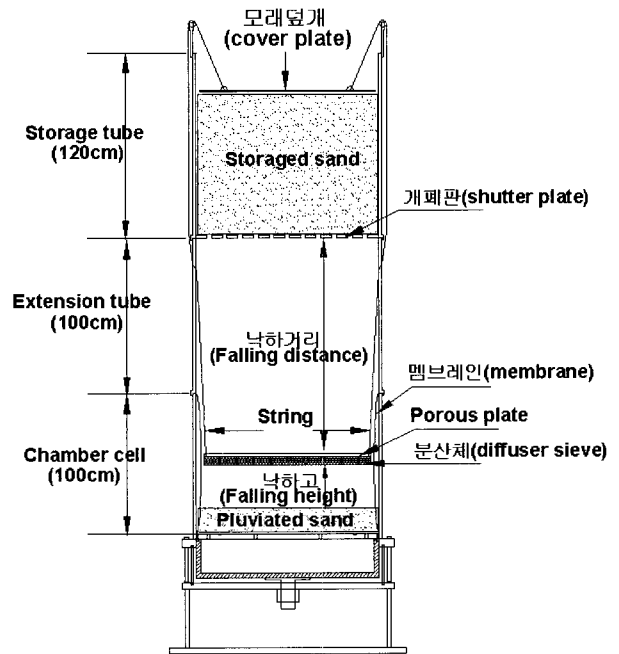


그림 3. 레이닝 시스템 모식도

표 2. Porous plate를 이용한 레이닝 시스템의 특성

구 분	기존 레이닝 시스템	Porous plate를 이용한 레이닝 시스템
상대밀도 결정	<ul style="list-style-type: none"> 개폐율 조절법으로 상대밀도 결정시 제약 시료의 특성(크기, 형상 등)이 변경될 경우 시스템의 재구성 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 필요에 따라 낙하고와 개폐율을 동시에 조절하므로 다양한 상대밀도 구현 가능 시험시료 특성(크기, 형상 등) 변동에 대한 적용성 증가
상·하부 균일성	<ul style="list-style-type: none"> 낮은 상대밀도일수록 개폐율이 증가 침전도 증가에 따른 동적에너지 증가로 상·하부 밀도차 발생 	<ul style="list-style-type: none"> 종단 속도 이하로 입자가 낙하하므로 동적 에너지 발생량이 작음 기존 시스템과 반대로 상대밀도와 동적 에너지 발생량이 비례 관계를 가지므로 밀도차 감소
제작의 편의성	<ul style="list-style-type: none"> 다양한 개폐율을 가진 시스템 필요 상대밀도, 개폐율 조건을 시행착오적으로 결정 시료가 변경될 경우 시스템의 전반적인 수정이 발생할 가능성 존재 	<ul style="list-style-type: none"> 1~2가지의 개폐율 조건과 낙하고로 상대밀도 결정 시료가 변경되어도 낙하고 조건 수정으로 대처 가능
시험의 편의성	<ul style="list-style-type: none"> 상대밀도 조건에 따라 storage tube 개폐율 조정 	<ul style="list-style-type: none"> 낙하고 변경으로 상대밀도 조절

본으로 본 연구의 chamber 구조에 맞게 개량되었다. 직경 1.2m, 높이 1.0m의 상부 storage tube는 시험에 쓰일 모래시료가 저장되는 부분으로, storage tube 아래부분의 개폐판에 의해 레이닝 되는 모래시료 침전도가 조절된다. 중간부분의 1.0m 높이인 extension tube는 적정 낙하고를 제공하기 위해 필요한 부분으로, extension tube의 길이에 의해 실험 가능한 낙하고와 낙하거리의 한계가 결정된다. 높이 1.0m인 하부의 chamber cell은 시험을 위한 시료의 몰드 역할을 하며, 레이닝에 의해 시료가 조성되는 부분이다. 또한 분산체는 시료의 균일한 낙하를 위한 분산 역할을 한다. storage tube 내의 모래가 하강하여 모래덮개가 내려가면 덮개와 줄로 연결된 분산체가 위로 올라가게 되므로, calibration chamber 내에 조성되는 시료의 상단부와 분산체는 항상 일정한 거리를 유지한다.

3.2.3 분산 시스템(Porous Plate + 분산체)

본 연구에서 사용된 레이닝 시스템의 기본 구성은 Sweeney and Clough(1990)이나 Rad and Tumay(1987)가 제안한 기존 시스템과 유사하지만, 기존의 분산 시스템에 porous plate의 개념이 추가되었다. 그림 4와 같이 개선된 분산 시스템은 총 3개의 층으로 구성된다. Porous plate는 분산체를 통과하는 모래의 낙하속도를 동일하게 유지시킨다. 하부 2개 층은 기존 system의 분산체로써, 분산의 효과를 극대화하기 위해 상·하의체가 45°를

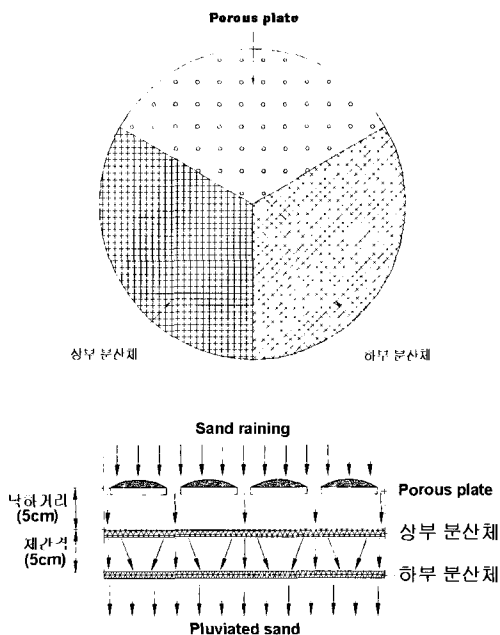


그림 4. Porous plate 구조 및 분산효과 모식도

이루도록 조합하였다. 분산체는 필요에 의해 다양하게 적용될 수 있으며, 본 연구에서는 공칭치수 4.75mm의 체를 사용하였다.

Porous plate는 낙하거리라는 영향요인을 제거하고, 낙하되는 모래의 상대밀도를 낙하고에 의해 조절하기 위해 도입된 개념이다. 그림 3은 제안된 분산체 시스템에서의 모래낙하 및 분산의 원리를 보여주고 있다. 기존의 분산체만 사용하였을 경우에는 분산체를 통과하는 모래의 낙하속도가 낙하거리에 영향을 받을 수 있지만, porous plate를 사용할 경우에는 낙하거리에 관계없이 동일한 낙하속도를 지니는 모래가 분산체를 통과하게 되어 시료 상·하부의 상대밀도가 균등하게 조성된다.

4. 시험조건 및 순서

4.1 모래 기본물성

본 시험에서 사용된 모래시료 입도분포는 그림 5와 같으며, 평균입경(D_{50})은 0.31mm이고 유효입경(D_{10})은 0.16mm로써 통일분류법(USCS)상 SP에 해당된다. 또한 모래의 비중은 2.62이고, 최소간극비(e_{min})는 0.658, 최대간극비(e_{max})는 1.063이다. 모래의 형상을 전자주사현미경을 통해 관찰한 후 Wadell(1932)의 방법에 의해 분석한 결과, sub-angular의 모래로 판단되었다. 또한 XRF 성분분석 결과, SiO_2 함량이 76%인 실리카질 모래이다.

4.2 시험조건

개선된 레이닝 시스템을 평가하기 위해 분산체만을

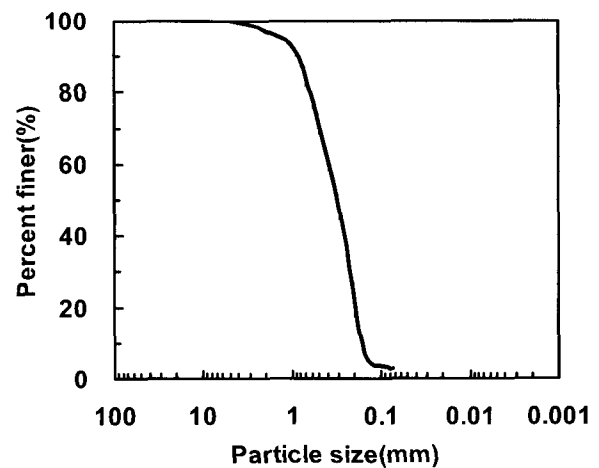


그림 5. 모래시료 입도분포

사용하는 경우와 porous plate와 분산체가 동시에 사용하는 경우로 구분하여 시험을 실시하였다(표 3). Storage의 개폐율은 1%와 4%로 조정하였으며, 개선된 레이닝 시스템은 1% 개폐율을 적용하여 평가하였다. 개폐판에 작용하는 상재압은 저장된 모래의 양에 의해 결정되며, 목표 상대밀도에 따라 13.5~15.1 kPa이 작용하지만 시료의 상대밀도에는 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. Porous plate를 사용하지 않았을 경우 모래의 초기 낙하거리는 135~175cm로써 레이닝이 진행됨에 따라 감소하는 반면, porous plate를 사용할 경우 낙하거리는 항상 5cm로 일정하며, 낙하고는 초기에 조정된 값(20~60cm)으로 일정하게 유지된다. 사용된 분산체의 공칭치수는 4.75mm이고, 2개의 체를 5cm 간격으로 설치하였다. 개선된 시스템의 porous plate에는 직경 12mm 구멍을 70mm 간격의 정방형으로 배치하였다.

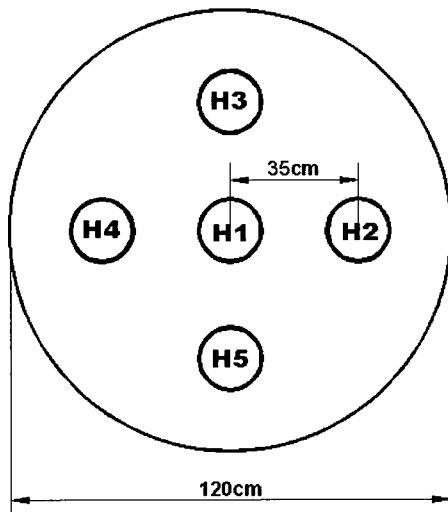
표 3. 시험조건

영향요인	단위	Porous plate	
		사용 전	사용 후
개폐율	%	1, 4	1
개폐판 상재압	kPa	13.5 ~ 15.1	13.5 ~ 15.1
낙하거리	cm	35 ~ 175	5
분산체 간격	cm	5	5
낙하고	cm	20 ~ 60	20 ~ 60
분산체 공칭치수	mm	4.75	4.75
분산체 개수	-	2	2
porous plate 공극율	%	-	2.3

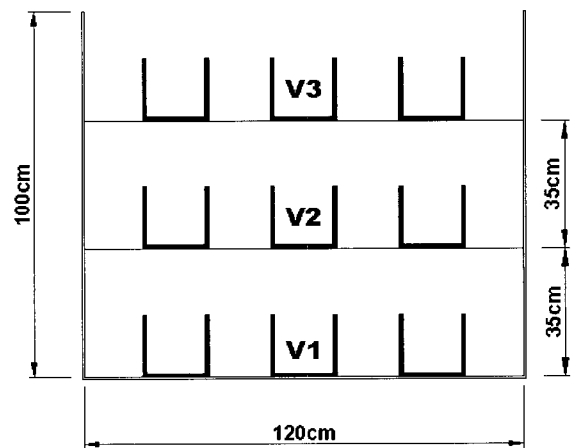
4.3 시험방법

레이닝 시스템에서는 storage tube의 모래 하강속도와 chamber cell의 모래 상승높이가 동일하게 유지되어야 균등한 상대밀도의 시료조성이 가능하다. 따라서 storage tube에 채워지는 모래의 밀도를 조성될 시료의 상대밀도와 비슷하게 유지하기 위해, 조성될 시료의 상대밀도에 대해 계산된 모래의 양을 storage tube에 비교적 균질하게 채워 레이닝 전·후 모래의 상대밀도가 유사하도록 하였다. 모래로 채워진 Storage tube를 extension tube 위에 거치하고 모래덮개를 덮은 후, 분산 시스템과 네 방향으로 연결된 줄을 모래덮개에 연결하고 개폐판을 열어 레이닝을 시작한다. 레이닝이 진행됨에 따라 모래덮개는 내려가고, 동시에 네 방향의 줄로 연결된 분산 시스템이 올라가면서 낙하고는 일정하게 유지된다. 이 때 네 방향의 줄의 길이를 일정하게 하여 분산시스템의 평형을 유지시키는 것이 중요하다. 레이닝이 완료되면 개폐판의 구멍을 닫고 storage tube와 extension tube를 제거한 후 모래의 상대밀도를 측정하였다.

조성된 시료의 상대밀도는 레이닝이 시작되기 전 chamber cell 내부에 놓여진 직경 16cm, 높이 16cm인 원통형 몰드에 채워진 모래중량으로부터 측정되었다. 우선 레이닝이 진행되기 전 chamber cell 하부(V1위치)에 원통형 몰드를 그림 6(a)와 같이 배치하고 레이닝을 시작하였다. 모래시료가 35cm정도 낙하하면 개폐구멍을 막고 상부 storage tube를 제거한 후, 조성된 시료의 상부에 또 다른 5개의 몰드(V2위치)를 배치하고 레이닝



(a) 수평방향 몰드 배치



(b) 연직방향 몰드 배치

그림 6. 상대밀도 측정용 몰드 배치

을 계속 진행하였다. 같은 방법으로 시료 상층부에 15개의 몰드를 배치하였다(그림 6(b)). 레이닝이 완료된 후, 조성된 모래를 조심스럽게 해체하여 몰드 내부의 모래 중량을 측정하였다.

5. 시험 결과 및 분석

5.1 Porous plate 사용 전

기존의 연구자들에 의해 제안된 레이닝 시스템으로 낙하고 및 개폐율에 따라 레이닝을 실시한 후, 수평, 수직방향 상대밀도 분포를 측정하였다. 레이닝 시스템의 개폐율은 1, 4%로, 그리고 낙하고는 20~60cm로 조절하였다. 이때 모래의 낙하거리는 35~175cm까지 변화하였다.

5.1.1 수평방향 상대밀도 분포

조성된 시료의 수평방향 균질성은 수평방향으로 배치된 5개 몰드 내부의 모래중량을 측정하여 확인하였다. 그림 7은 porous plate를 사용하기 전 개폐율 4%, 낙하고 40cm에 의해 조성된 시료의 수평방향 상대밀도 분포이다. 동일한 높이에서 상대밀도의 수평방향 표준편차는 2.6~4.4%로 나타났으며, 시료 상부(V3)의 오차가 가장 크게 발생하였다. Bellotti 등(1982)의 결과에서는 평균 59% 상대밀도의 시료에서 수평방향으로 약 10%의 표준편차가 나타났으며, Borden(1991)은 평균 47% 상대밀도의 시료에서 약 7%의 수평방향 표준편차가 발생한 것을 확인하였다. 본 연구의 수평방향 상대밀도 오

차는 기존의 연구결과에 비해 작게 발생하였다.

5.1.2 연직방향 상대밀도 분포

그림 8과 같이 개폐율이 증가하고 낙하고가 감소할수록 상대밀도는 감소하며, 특히 개폐율에 의한 상대밀도의 변화정도가 뚜렷하게 나타났다. 기존의 시스템은 낙하고를 중단낙하고 이상으로 유지시켜 균질한 상대밀도의 시료를 조성하고자 하였다. 그러나, 본 연구에서는 시료 상부의 상대밀도가 하부의 상대밀도보다 비교적 낮게 조성되는 것으로 나타났다. 즉, 1% 개폐율인 경우 상·하부 상대밀도차가 1~3% 정도 나타났으며, 4% 개폐율인 경우 4.5~7%의 상대밀도차가 나타났다. 개폐율이 증가하여 상대밀도가 작게 조성될수록 시료 상하부의 상대밀도차가 더 크게 발생하였으며, 이는 그림 2에서 나타난 Puppala 등(1995)의 결과와 일치한다. 이 같은 결과는 하강하는 입자의 침전도에 따른 에너지 전달에 의한 영향과 함께 감소하는 낙하거리의 영향으로 판단된다. 개폐율의 증가에 따른 침전도 증가는 상대밀도와 반비례 관계에 있으므로, 상대적으로 느슨한 시료에 많은 동적 에너지가 축적되면서 발생한 것으로 판단된다.

또한 기존 시스템의 낙하고에 따른 영향을 분석하기 위하여 동일한 개폐율 상태에서 낙하고 20, 40, 60cm에서의 평균 상대밀도를 도시하면 그림 9와 같다. 그림 9에 의하면 1% 개폐율에서는 상대밀도 91~96%의 시료가 조성되었고, 4% 개폐율인 경우 71~80%의 시료가 조성되었다. 개폐율이 클수록 상대밀도에 대한 낙하고의 영향이 크게 나타나는 것을 관찰하였다.

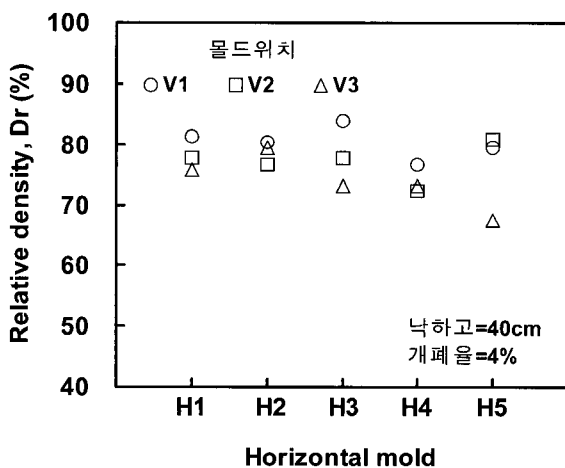


그림 7. 수평방향 몰드의 상대밀도 분포(porous plate 사용 전, 낙하고=40cm, 개폐율 4%)

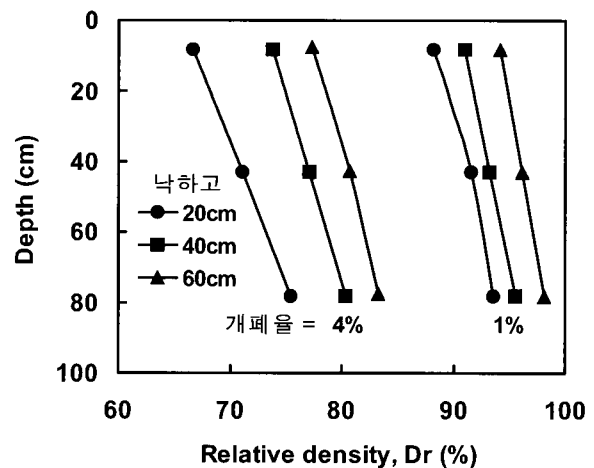


그림 8. 낙하고 및 개폐율에 따른 연직방향 상대밀도 분포(porous plate 사용 전)

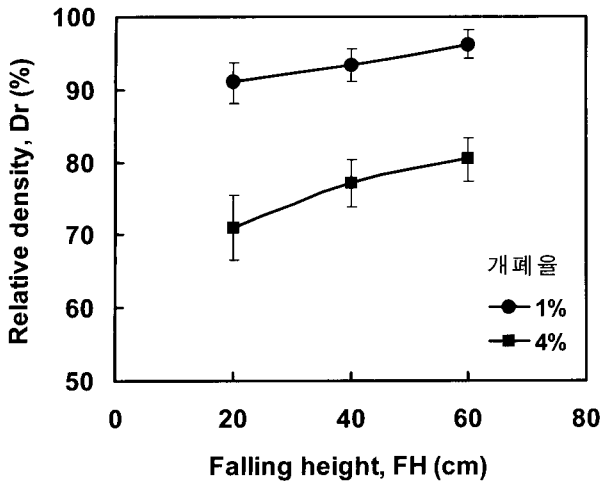


그림 9. 낙하고 및 개폐율에 따른 평균 상대밀도 변화(porous plate 사용 전)

Rad and Tumay(1987)는 모래입자의 낙하고를 중단 낙하고 이상이 되도록 낙하고 및 낙하거리를 조정하여 시료의 상대밀도를 개폐율에 의존하는 시스템을 설계하도록 제안하였다. 그러나 이후의 논문을 살펴보면 레이닝 시스템의 특성에 따라 동일한 시료에서 각기 다른 개폐율을 사용하더라도 분산체의 조합 및 낙하고 등의 영향에 의해 유사한 상대밀도의 시료가 조성되는 것으로 나타났다(Puppala 등 1995; Sweeney and Clough 1990). 실험결과 기존 시스템은 상대밀도 조절을 위하여 개폐율과 낙하고를 동시에 사용할 수 있으나 시료 상하부의 밀도차가 존재하여 양질의 시료를 조성하기 어려우며, 특히 낮은 상대밀도 시료 조성 시 문제점이 발생하였다.

5.2 Porous plate 사용 후

Porous plate와 분산체를 모두 사용하고 개폐율 1% 상태에서 실험을 실시하였다. 전술한 바와 같이 porous plate 사용으로 인해 낙하거리는 5cm로 일정하게 유지되며, 낙하고는 초기에 설정된 높이로 유지하였다.

5.2.1 수평방향 상대밀도 분포

그림 10은 Porous plate를 설치하고 난 후 개폐율 1%, 낙하고 40cm인 경우에 나타나는 모래의 수평방향 상대밀도 분포이다. 수평방향 상대밀도의 표준편차 2.6~2.8% 발생하였으며, 시료 상부(V3)의 오차가 가장 크게 발생하였으나 큰 경향이 나타나진 않았다. 또한 porous plate를 사용하기 전에 비해 발생하는 수평방향 오차가 감소하였으나, porous plate 사용여부에 관계없이 조성

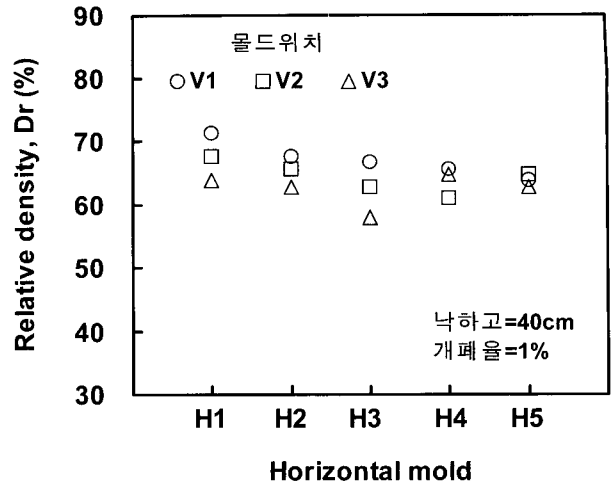


그림 10. 수평방향 몰드의 상대밀도 분포(porous plate 사용후, 낙하고=40cm, 개폐율 1%)

된 시료의 수평방향 균질성은 모두 양호한 것으로 평가된다.

5.2.2 연직방향 상대밀도 분포

Storage tube로부터 낙하하는 모래는 porous plate 위로 1차적으로 낙사하여 위치에너지를 상실하게 된다. 따라서 낙하거리에 따른 낙하속도의 차이는 발생하지 않으며, 낙하고만 일정하게 유지된다면 수직방향 상대밀도의 차이는 거의 발생하지 않는다. 그림 11은 porous plate를 사용하였을 경우 낙하고에 따른 시료의 연직방향 상대밀도 분포를 보인다. 그림 11에 의하면 시료 연직방향 상대밀도차가 5% 이내에서 발생하여, porous plate 사용 전에 보였던 최대 9%의 연직방향 상대밀도 차이가 뚜렷이 감소하였다. 즉 porous plate의 사용으로

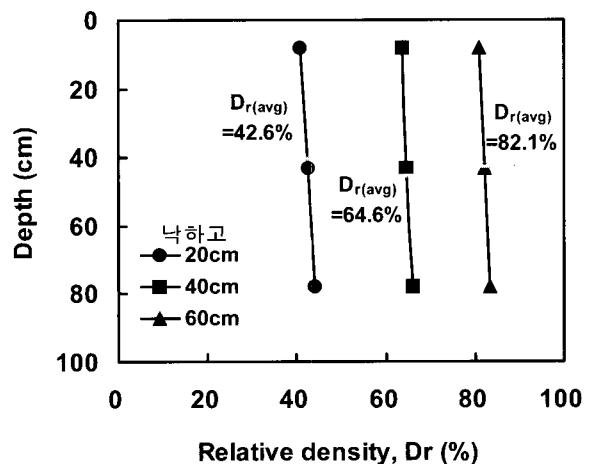


그림 11. 낙하고에 따른 연직방향 상대밀도 분포(Porous plate 사용후, 개폐율 1%)

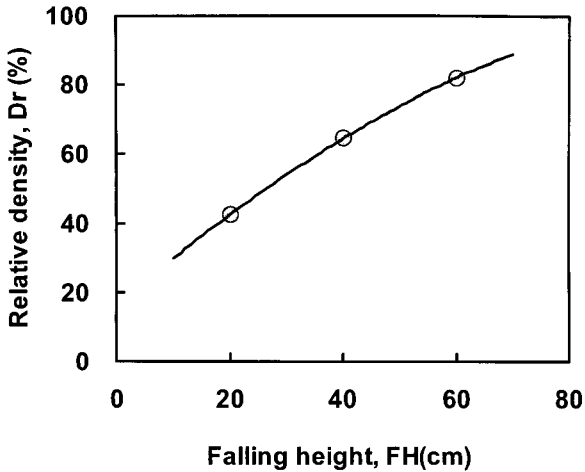


그림 12. 낙하고-상대밀도 관계(Porous plate 사용 후, 개폐율 1%)

연직방향 균질성이 향상되었다. 이때, 낙하고에 따른 시료의 상대밀도 변화양상은 거의 비슷한 것으로 나타났다. 또한 그림 12로부터 개폐율 1%의 porous plate를 사용할 경우, 낙하고를 20~60cm로 조절하여 약 42~82% 상대밀도의 시료까지 조성할 수 있음을 알 수 있다. 이는 낙하거리의 영향을 받던 기존의 레이닝 시스템에서 탈피하여, porous plate의 적용으로 모래시료의 상대밀도가 낙하고의 영향만으로 조절될 수 있음을 의미한다.

5.2.3 시료의 균질성 평가

그림 13은 상대밀도에 따른 시료 상·하부 상대밀도의 표준편차이다. 일반적으로 낮은 상대밀도의 시료를 조성할수록 시료 상·하부 상대밀도차가 더 크게 발생하였다. Porous plate를 사용하지 않을 경우, 71~96%의 상

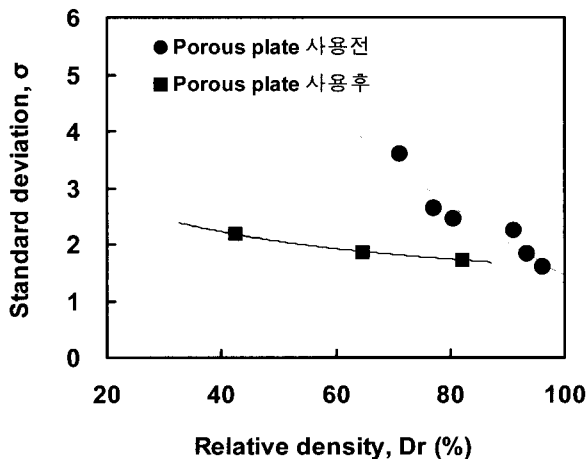


그림 13. 연직방향 상대밀도 표준편차

대밀도 조성 시 1.6~3.6%의 표준편차가 발생하였으나, porous plate를 사용할 경우에는 42~82%의 상대밀도 조성 시 1.7~2.2%의 표준편차가 발생하였다. 즉 porous plate에 의해 넓은 범위의 상대밀도 시료 조성이 가능하면서도 상대밀도의 편차는 더 적게 발생하였다.

6. 결론

본 연구에서는 모래시료 조성을 위해 사용되는 레이닝 시스템의 원리와 영향요인을 살펴보고 기존 레이닝 시스템의 문제점을 분석한 후, porous plate를 사용한 레이닝 시스템을 제안하여 조성된 시료의 수평, 연직방향 상대밀도의 균질성을 평가하였다.

기존 레이닝 시스템을 통해 조성된 시료는 수평방향으로 비교적 균질한 상대밀도로 조성되었으나, 연직방향으로는 상대밀도 차가 상대적으로 크게 발생하였다. 이는 레이닝에 따른 낙하거리의 감소 또는 중단낙하고 이상에서 낙하하는 입자의 에너지가 기 침전된 시료에 전달되기 때문으로 판단된다. 이때, 개폐율 또는 침전도와 상대밀도의 반비례관계에 의하여 상대밀도가 낮은 시료일수록 연직방향 상·하부 밀도차는 증가하는 것으로 나타났다.

개선된 레이닝 시스템에서는 분산체 위에 porous plate를 설치하여 분산체에 도달하는 모래의 속도가 항상 일정하도록 하였으며, 그 결과 porous plate와 분산체와의 낙하거리가 항상 일정하여 연직방향으로 좀 더 균질한 시료가 조성되었다.

Rad and Tumay(1987)를 비롯한 기존의 레이닝 시스템은 상대밀도를 조절함에 있어 개폐율 우선의 원칙을 적용하여 개폐율과 동시에 분산체의 조합 및 낙하고 변경으로 목표 상대밀도의 시료를 조성하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 제안된 시스템은 개폐율의 조정보다는 낙하고의 조정만으로 다양한 상대밀도의 시료, 특히 낮은 상대밀도의 시료도 조성이 용이한 것으로 나타났다. 또한 낙하고와 개폐율을 동시에 조절할 수 있으므로 다양한 시료특성의 변화에 적응할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개

발사업(과제번호:C104A1000009-06A0200-00800)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Bellotti, R., Bizzi, G. and Ghionna, V. (1982), "Design, construction, and use of a calibration chamber", *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II*, Amsterdam, Vol.2, pp.439-446.
2. Borden, R.H. (1991), "Boundary displacement induced by DMT penetration", *Proc., First Int. Symp. on Calibration Chamber Testing (ISOCCTI)*, Elsevier, New York, N.Y., pp.101-118.
3. Brandon, T.L. and Clough, G.W. (1991), "Methods of sample fabrication in the Virginia Tech calibration chamber", *Proc., First Int. Symp. on Calibration Chamber Testing (ISOCCTI)*, Elsevier, New York, N.Y., pp.119-133.
4. Gilbert, P.A. (1984), "Investigation of density variation in triaxial test specimens of cohesionless soil subjected to cyclic and monotonic loading", *Technical Report GL-84-10*, U.S. Army Engineer Waterway Experiment Station, Vicksburg, MS.
5. Jacobsen, M. (1976), "On pluvial compaction of sand", *Rapport 9*, Aalborg Universitetscenter, Laboratoriet for Fundering, 20pp.
6. Kildalen, S. and Stenhamar, P. (1977), "NGI laboratory sand rainer", *Internal Report 51505-15*, Norwegian Geotechnical Institute
7. Kolbuszewski, J.J. (1948a), "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, London, pp.47-49.
8. Kolbuszewski, J.J. (1948b), "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, London, pp.158-165
9. Mori, K., Seed, H.B. and Chan, C.K. (1977), "Influence of sample disturbance on sand response to cyclic loading", *Contract Report s-77-3*, Waterways Experimental Station, Vicksburg, MS
10. Puppala, A.J., Acar, Y.B. and Tumay, M.T. (1995), "Cone penetration in very weakly cemented sand", *J. of Geotech. Engrg., ASCE*, Vol.121, No.8, pp.589-600.
11. Rad, N.S. and Clough, G.W. (1982), "The influence of cementation on the static and dynamic behavior of sands", *Rep. No.59*, The John A. Blume Earthquake Engrg. Ctr., Stanford University, Stanford, Calif.
12. Rad, N.S. and Tumay, M.T. (1986), "Effect of cementation on penetration resistance of sand-a model study", *Geotech. Testing J., ASTM*, Vol.9, No.3, pp.117-125.
13. Rad, N.S. and Tumay, M.T. (1987), "Factors affecting sand specimen preparation by raining", *Geotech. Testing J., ASTM*, Vol.10, No.1, pp.31-37.
14. Sweeney, B.P. and Clough, G.W. (1990), "Design of a large calibration chamber", *Geotech. Testing J., ASTM*, Vol.13, No.1, pp.36-44.
15. Tumay, M.T., Antonini, J. and Arman, A. (1979), "Metal versus non-woven fiber fabric earth reinforcement in dry sands : A comparative statistical analysis of model tests", *Geotech. Testing J., ASTM*, Vol.2, No.1, pp.44-56
16. Wadell, H. (1932), "Volume, shape and roundness of rock particles", *J. Geol.*, Vol.40, pp.443-461

(접수일자 2006. 12. 4, 심사완료일 2007. 6. 11)