

발 간 등 록 번 호
11-1613000-001558-01

15CTAP
C078832

3D프린팅된 비정형 입자로 구성된 입상체의
지반-구조물 상호작용 영역에서 광탄성 측정기법을
이용한 지반 내 주응력 분포 측정기술 개발
최종보고서

2016. 07. 29.

주관연구기관 / 경희대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원



제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "3D 프린팅된 비정형 입자로 구성된 입상체의 지반-구조물 상호작용 영역에서 광탄성 측정기법을 이용한 지반 내 주응력 분포 측정기술 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2016 . 07 .

주관연구기관명 : 경희대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 정 영 훈

연 구 원 : 신상영 / 이태희 / 김우용

김태균 / 심단비 / 김윤진

보고서 요약서

과제고유번호	15CTAP-C 078832-02	해 당 단 계 연 구 기 간	2014.08.14. ~ 2016.08.26	단 계 구 분	2 / 2
연 구 사 업 명	국토교통기술촉진연구사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	3D 프린팅된 비정형 입자로 구성된 입상체의 지반-구조물 상호작용 영역에서 광탄성 측정기법을 이용한 지반 내 주응력 분포 측정기술 개발			
	단위과제명	-			
연 구 책 임 자	정 영 훈	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 7명 내부 : 7명 외부 : 0명	총연구비	정부 : 100,000 천원 기업 : 천원 계 : 10,000 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	경희대학교 산학협력단		참여기업명	-	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약				보고서면수	58
- 비정형 입자가 적층된 대규모 모형 입상체 지반의 구축과 이를 이용한 주응력 방향 조절 재하 시험 및 광탄성 이미지 분석을 목적으로 함 - 다양한 크기의 비정형 입자를 제작하고 재하장비를 구축 - 광탄성 재료로 만들어진 입자의 접촉력 전달 패턴을 효과적으로 관찰하기 위해 LED백라이트 기술을 이용한 편광조명 광탄성 측정장치를 개발 - 로드셀과 LVDT를 이용하여 입상체에 대한 변위-응력 통합 측정기술 개발 - 지반 아칭 효과가 발현될 수 있는 지반-구조물 모형을 구성하고 주응력 분포를 측정 - 3D 프린터를 이용하여 비정형 입자 3차원 출력 기술 개발					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	광탄성, 주응력, 3차원 프린팅, 비정형 입자, 편광 조명			
	영 어	Photoelasticity, Principal stress, 3D printing, Atypical particle, Polarized light			

요 약 문

I. 제 목

- 3D 프린팅된 비정형 입자로 구성된 입상체의 지반-구조물 상호작용 영역에서 광탄성 측정기법을 이용한 지반 내 주응력 분포 측정기술 개발

II. 연구개발과제 개요

- 3차원 프린팅 기술로 제작된 비정형 입자를 적층하여 입상체 모형 지반을 구성한다. 광탄성 재료로 만들어진 입자의 접촉력 전달 패턴을 효과적으로 관찰하기 위해 LED 백라이트 기술을 이용한 편광조명 광탄성 측정장치를 개발한다. 지반 아칭 효과가 발현될 수 있는 지반-구조물 모형을 구성하고 입상체 상부면에 주응력 방향 조절이 가능한 재하 장치를 이용하여 재하시험을 실시하여 주응력 분포를 측정한다.

III. 연구개발 수행내용 및 결과

- 대규모 광탄성 모형 지반 실험체 및 재하장비 구축
- 광탄성 입자의 대량 제작기술 개발
- LED 백라이트 편광조명 광탄성 측정장치 개발
- 대규모 광탄성 모형 지반에 대한 재하 시험
- 타원형 형태의 광탄성 입자의 제작 기술 개발
- 지반 아칭 효과 분석을 위한 지반-구조물 접촉 모형 제작
- 3차원 프린팅 기술을 이용한 비정형 광탄성 입자 제작
- 3차원 프린터를 이용한 비정형 입자 제작

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

- 3000개 이상이 광탄성 입자와 관련 재하 장치 제작
- 지반 구조물 모형에 힘-전달구조를 이용한 주응력 분포 측정 기술 적용
- 3차원 프린팅을 이용한 비정형 입자의 출력 기술 개발

V. 연구목표 달성 및 효과

- 3차원 프린팅된 비정형 입자가 적층된 대규모 모형 입상체 지반의 구축과 이를 이용한 주응력 방향 조절 재하 시험 및 광탄성 이미지 분석을 위한 장치 개발

VI. 연구성과 활용계획

- 대규모 광탄성 모형 입상 시험체를 활용하여 말뚝 기초, 지반조사, 터널 등 지반-구조물 사이에서 나타나는 지반 공학적 문제 모사

SUMMARY

(영문 요약문)

I . Title of research

- Photoelastic measurement of principal stress distribution in a particulate assembly of atypically-shaped particles with soil-structure interaction

II. Summary of research

- The overall aim of this research is to compose particulate assembly stacked atypical particles made by using 3D printing techniques. The atypical particles using photoelastic materials are effective to measure contact force chain. To effectively measure contact force chain, polarized light using LED backlight techniques was developed. Soil-structure model was composed to atypical particles to check soil arching effect.

III. Research contents

- Development of the photoelastic model particles assembly and load frame
- Development of manufacture techniques of photoelastic particle
- Development of polarized light system using LED backlight
- Loading experiment using photoelastic particle
- Development of manufacture techniques of an ellipse shape photoelastic particle
- Production of soil-structure model to check soil arching effect
- Production of atypical particles using 3D printing techniques

IV. Research results

- Development of more than 3,000 photoelastic particles and loading frame
- Application of principal stress measurement techniques using contact force chain by soil-structure model
- Development of atypical particles printing techniques using 3D printing techniques

V. research objective achievement

- Development of model particle assembly using 3D printed atypical

particle

- Development of equipment for photoelastic image analysis

VI. Expected contribution of research

- Prediction of geotechnical problem such as tunnel, pile foundation, ground investigation using photoelastic model particle assembly

CONTENTS

Chapter 1. Research summary	7
- Research purpose and importance	7
- Research objective	14
- Internal and external technical development condition	15
- Position of research results in associated field	23
 Chapter 2. Research contents and results	 25
- Research strategy and methodology	25
- Research process and contents	25
- Research results and verification	49
 Chapter 3. Research performance and application result	 51
- Research performance	51
- Research application result	52
 Chapter 4. Research objective achievement and effect	 53
- Research objective achievement	53
- Technical effect of research	53
- Economical effect of research	53
 Chapter 5. Application of research and necessity of additional research	 54
- Application of research	54
- Necessity of additional research	54
 Reference	 55

목 차

제1장 연구개발과제 개요	7
- 연구개발의 목적 및 필요성	7
- 연구개발의 목표	14
- 관련분야의 국내외 기술개발 현황	15
- 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치	23
제2장 연구개발 수행 내용 및 결과	25
- 연구수행 전략 및 방법론	25
- 연구수행과정 및 내용	25
- 연구수행결과 및 결과의 검증 방법	49
제3장 최종 연구성과 및 적용실적	51
- 최종 연구성과	51
- 연구개발 적용 실적	52
제4장 연구목표 달성 및 효과	53
- 연구개발 최종목표 달성도	53
- 연구개발 성과의 기술적 효과분석	53
- 연구개발 성과의 경제적 효과분석	53
제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	54
- 연구성과 향후 활용방안	54
- 추가연구 필요성	54
참고문헌	55

[부 록]

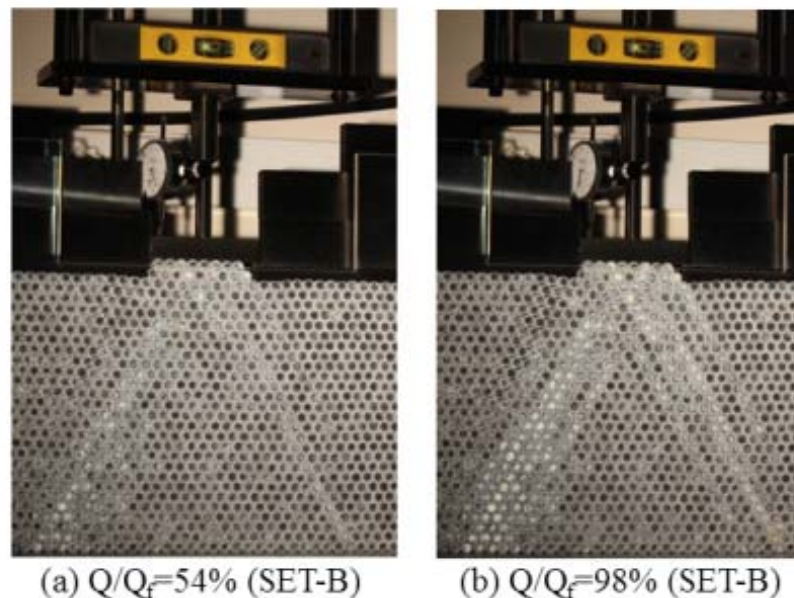
1. 논문, 특허 등 정량적 성과와 정성적 성과
2. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보
3. 기타사항

제1장 연구개발과제 개요

1. 연구개발의 목적 및 필요성

(1) 연구의 목적

- 본 연구의 목적은 3차원 프린팅된 비정형 입자가 적층된 대규모 모형 입상체 지반의 구축과 이를 이용한 주응력 방향 조절 재하 시험 및 광탄성 이미지 분석을 위한 장치 개발에 있다.
- 일반적인 지반공학적 설계는 토체 내부에서 주어지거나 가정된 파괴면에서 극한 평형 상태(limit equilibrium state)에 놓인 힘의 평형 상태를 가정하여 이루어진다. 이러한 설계 방법의 이론적 배경은 금속과 같은 연속체 재료에 대한 고전적 소성 이론의 가설로부터 출발한다.
- 하지만 이러한 가정 조건은 토체가 파괴 상태에 놓였을 경우에는 일부 타당한 가정이지만, 파괴 이전 상태에 놓인 입상체 지반 재료의 하중-변위 관계를 정밀하게 예측하거나 점진적 파괴 과정(progressive failure)을 예측하기에는 매우 부적절한 접근 방법이다.



[그림 1.1] 원형 입자를 적층한 입상체 상부에 수직 재하 시켰을 때 발생한 접촉력 사슬 분포 양상. 광탄성 측정 장비를 이용하여 이미지를 획득할 수 있다(정영훈과 정재우, 2014). (a)는 파괴 시 재하하중 Q_f 의 54%가 가해졌을 때이고, (b)는 98%가 가해져서 파괴 직전 상태이다. 파괴 직전까지 접촉력 사슬 구조가 뚜렷하게 형성된다.

- 파괴 이전 상태에 놓인 입상체 지반 재료의 거동을 이해하기 위해서는 입자 접촉에 의한 내부 힘전달 구조가 어떻게 이루어지고 이 구조가 파괴 상태까지 어떻게 변화하는지 관찰하는 것이 필요하다. 하지만 입자 접촉력의 전달 과정은 특수한 장비가 없이는 쉽게 관찰할 수 없다.
- 본 연구제안자는 기본적인 광탄성 측정장비를 이용하여 제한된 숫자의 원형 입자로 적층된 모델에 대한 시험을 수행하였고 파괴 이전 상태의 입상체 지반에서 접촉력 사슬로 나타나는 힘 전달 구조의 관찰이 가능함을 확인하였다.
- 하지만 현재 기초 연구 중 나타난 문제점은 (i) 입자의 숫자가 수백 여개에 불과하여 실제 지반 조건을 모사하기에 한계가 있으며, (ii) 원형 입자만을 사용하여 실제 입자 형상과는 차이가 있으며, (iii) 기존 반사형 광탄성 측정 장비로 넓은 면적을 효율적으로 관찰하기에는 한계가 있으며, (iv) 연직방향의 얇은 기초 하중만을 가할 수 있어서 다양한 지반구조물을 모사하기에 한계가 있다.
- 상기 제시한 문제점들을 해결하기 위해 본 연구개발과제를 통해 정부의 지원을 받고자 한다. 본 연구과제는 이론적인 기초 연구이지만, 파괴 이전의 지반 거동을 정확하게 관찰할 수 있고 이로부터 파괴 이전 상태를 정확하게 표현하는 설계 변수를 유도할 수 있다. 이러한 변수를 현행 설계 절차에 포함시킨다면 매우 극한적인 파괴 상황을 가정하고 이후 안전율을 고려하는 보수적인 설계보다 파괴 이전상태에서 보다 실제에 가깝고 경제적인 지반구조물의 설계가 가능하다.
- 본 연구가 성공적으로 이루어져서 미소변형 수준에서 파괴 이후 상태까지의 입상체 토체 내부의 주응력 전달과정이 구체적으로 확인된다면 현재 매우 낮은 정밀도의 지반 지지력 산정 방법에 획기적인 개선을 이룰 수 있을 것이다.

(2) 연구의 필요성

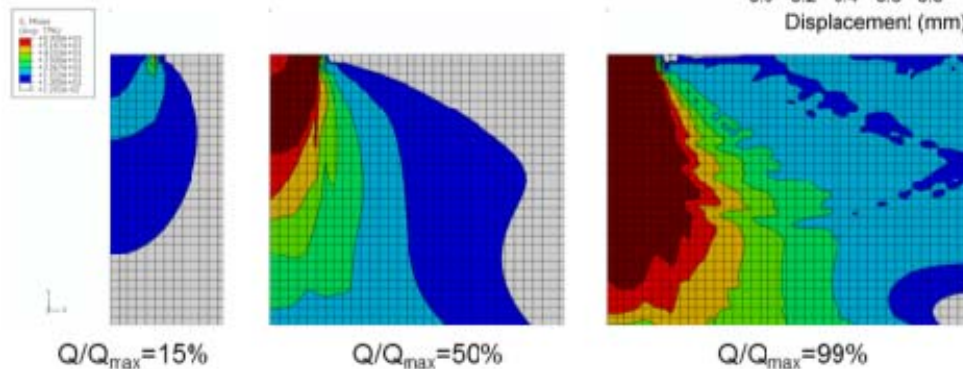
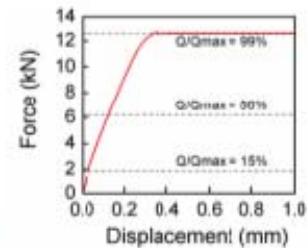
- 외부 하중을 받는 지반을 해석하는 경우, 파괴 이전 상태에서는 연속체 탄성 이론을 이용하여 하중-변위 관계를 예측하고 파괴 이후에는 소성 한계 이론에 근거하여 지반 안정성을 평가하기 위한 지지력(bearing capacity)을 산정하는 것이 일반적이다. 하지만 이러한 접근 방법은 금속과 같이 연속체로 간주할 수 있는 고체 재료에 대해서는 적절한 방법일 수 있지만, 입상체로 이루어진 지반 재료의 하중-변위 관계를 정밀하게 예측하기에는 부적절한 방법이다.
- 일례로 다양한 입경의 토질 재료로 다져진 성토지반 상에서 실시되는 평판 재하 시험을 생각해 보자. 파괴 하중에 도달하기 훨씬 이전의 초기 하중에서도

평판 근처의 지반은 이미 국부적으로 파괴가 일어날 것이고 이는 초기의 비선형적인 하중-변위 관계로 나타날 것이다.

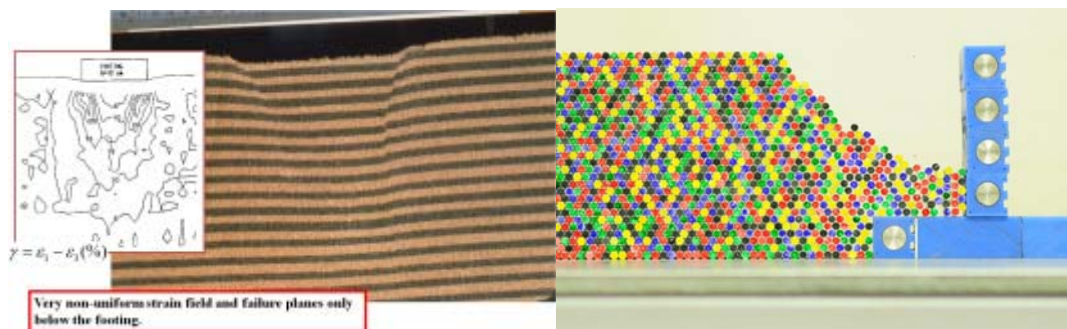
■ 이후 재하가 진행되더라도 파괴 전후의 하중-변위 곡선에서 뚜렷한 기울기의 차이를 찾기 힘든 것이 일반적인데, 이러한 문제점은 지반 재료를 국부적인 파괴가 연속적으로 일어나는 입상체 재료로 이해한다면 해결될 수 있는 사항이다. 따라서 간단한 얇은 기초 하중에 대해서도 지반을 입상체로 구성하고 실험한다면 소성 한계 이론에 근간하여 가정된 기존의 지반 거동과 차이를 확인해 볼 수 있다.

FEM Simulations
with linear elastic & Mohr-Coulomb plastic model

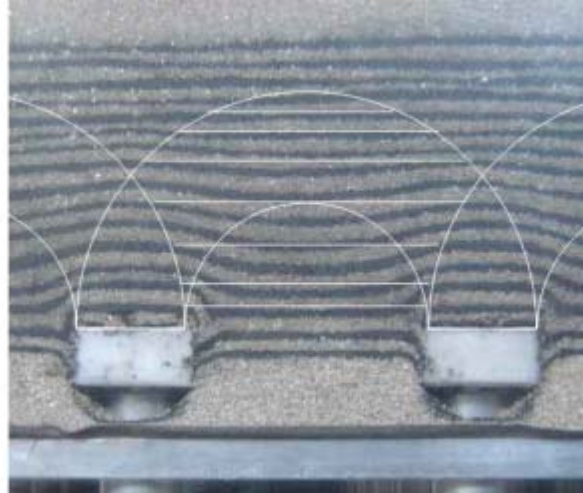
- Deviator stress increase with depth.
- No particular generation of "banded" line of stresses.



[그림 1.2] 연속체 이론에 근간한 모어-쿨롬 모델을 이용한 얇은 기초 하중 재하 문제에 대한 유한요소해석 결과. 등고선은 축차 응력 크기의 분포를 보여준다.



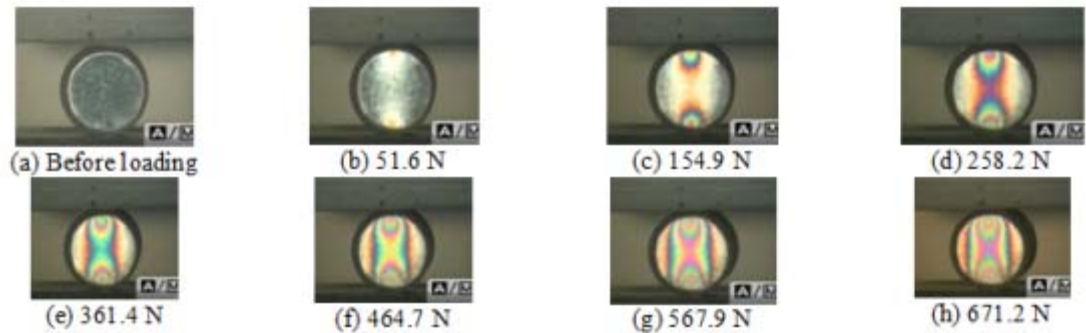
[그림 1.3] 지반 변형을 파악하기 위한 모델 시험 (좌측-Tatsuoka, 2005; 우측-김성수, 2010). 고전적인 토질역학 이론에서는 이론적인 파괴면을 가정하고 파괴면에 작용하는 응력 상태만을 고려하여 지지력을 산정한다. 파괴면은 모델 시험 결과에 대한 이미지 해석을 통해 측정할 수 있지만, 파괴면에 대한 응력 상태는 파악할 수 없다.



[그림 1.4] 말뚝으로 지지되는 성토층에서의 지반 아칭을 반영하는 토체 변형 형상 (건설교통부, 2007). 토체 내부의 변형 형태를 관찰하여 힘전달 구조인 아칭구조를 흰선으로 가정하였으나 실제 힘전달 구조는 육안으로 확인할 수 없다.

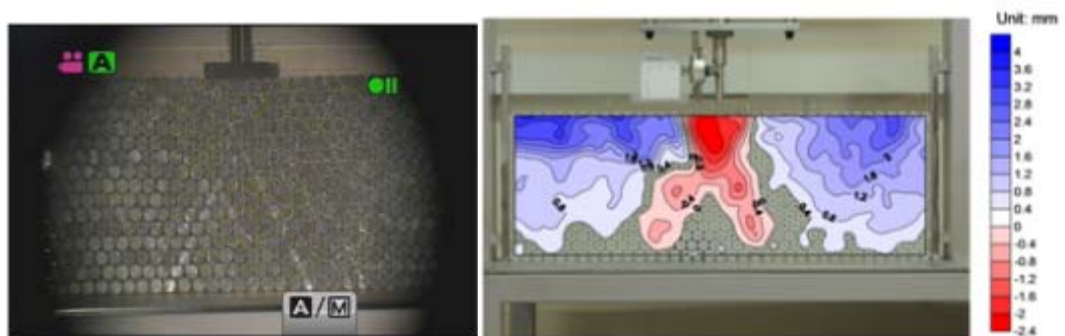
- 지반을 포함한 구조물에서 발생하는 대부분의 문제는 지반-구조물의 상호작용을 정확하게 파악하지 못하기 때문에 발생한다. 예를 들어 말뚝으로 보강된 연약지반 상부에 놓인 성토체는 전형적인 사질토 입상재료로 이루어지는데, 연약지반의 침하와 함께 그림 1.4와 같이 지반 아칭 현상이 발생된다. 지반 아칭 현상으로 인한 말뚝의 하중 분담 효과는 말뚝 작용력과 연직 토압 측정으로 간접 평가할 수 있지만, 토체 내부의 지반 아칭은 입상체 입자의 접촉력 전달 과정으로 이루어지므로 그림 1.4와 같은 입자 움직임의 관찰로는 측정할 수 없다.
- 알루미늄봉 또는 탄소봉을 이용하여 입상체 지반을 조성하여 기초의 극한지지력을 평가하거나(최명진, 1992), 앵커판의 지지거동(권오균, 1997) 또는 매설관 상재하중의 영향(문창열과 김희동, 2004), 디지털 이미지 해석 기법을 이용하여 용벽 배면 지반의 변형(김성수 등, 2011)을 분석하는 연구는 이미 상당한 진전을 이루었다.
- 이러한 기존의 연구는 입자의 이동을 관찰하여 입상체 지반의 변형 거동을 확인할 수 있다는 점에서 중요하지만, 내부 응력의 관찰이 불가능하다는 점이 시험의 한계이다. 대부분의 지반공학적 문제가 응력을 설계 변수로 사용하고 있으므로, 변위 측정만이 가능한 입상체 모형 지반에 대한 실험은 분명 제한적인 연구 결과만을 도출할 수 있다.
- 입상체 모형 지반의 응력 전달 패턴을 관찰하기 위해서 광탄성 기법(photoelasticity technique)을 도입할 수 있다. 광탄성이란 탄성체가 외력에 의해서 변형하면 광학적인 복굴절을 일으키며 줄무늬 패턴이 나타나는 현상을 의미한다. 광탄성 재료의 줄무늬 패턴색은 재료가 받고 있는 응력과 연관되며 이

특성을 이용하여 재료의 응력 상태를 관찰할 수 있다. 광탄성 원리를 이용하여 입상체를 구성하면 임의의 한 점이 아닌 대상 영역 전체의 응력 분포와 그 변화 양상을 한 눈에 파악할 수 있다는 장점이 있다.



[그림 1.5] 반사형 광탄성 시트를 부착한 단일 입자의 압축 시험 결과 (정영훈 등, 2013). 일축 하중이 입자에 가해지면 입자 변형에 따라 광탄성 시트가 빛에 반응하면서 고유의 프린지 패턴을 만들어낸다.

■ 기존의 투명한 재료 사용으로 인한 제약 조건을 벗어나기 위해 본 연구에서는 반사형 광탄성 기법을 도입하고자 한다. 그림 1.5는 본 연구과제 제안자에 의해 개발된 이상적인 토립자의 압축시험 결과를 보여준다. 여기서는 반사형 광탄성 기법을 사용하기 때문에 임의의 재료를 사용하여 임의의 형태로 입자를 제작할 수 있다. 따라서 실제 지반에서 나타날 수 있는 다양한 입자 간 접촉 상태를 보다 현실적으로 모사할 수 있다.

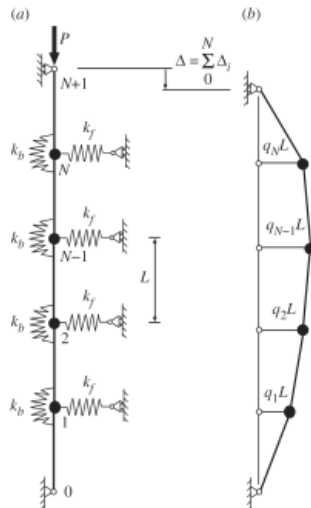


[그림 1.6] 반사형 광탄성 코팅재로 제작된 입자로 구성된 입상체 지반 (정영훈과 변보현, 2013). 좌측에서 입상체 지반이 하중을 받게 되면 힘을 전달받는 입자는 밝은 색을 띄게 된다. 우측은 입자의 변위를 디지털 이미지 해석으로 측정한 결과이다.

■ 그림 1.6은 제작된 입자를 쌓아 만들어진 입상체 지반이 얇은 기초 하중을 받았을 때 나타나는 광탄성 이미지와 디지털 이미지 해석을 통해 얻은 입자의 연직 변위 분포이다. 그림 1.6의 결과는 지반의 변위 또는 파괴면 만으로 내부 응력 상태를 파악하기는 어렵다는 것을 확연히 보여준다. 즉 그림 1.6의 우측에서는 기초면 하부의 켜기모양으로 국부적인 파괴면이 형성되며 입자군의 이동이

관찰되지만, 좌측의 입자 응력 분포에서는 이러한 국부적인 파괴면과 관계없이 하부 경계면으로 발달한 입자 접촉력 사슬이 형성되어 외적 하중을 지탱하고 있음을 보여준다. 이후 추가 하중에 의해 입상체가 결국 붕괴되지만 기존의 이론에서 설명하고 있는 파괴면의 점진적인 진행으로 붕괴되는 것이 아니라, 파괴 이전에 형성되었던 접촉력 사슬(contact force chain)의 좌굴에 의해 순간적으로 붕괴되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 연구 결과는 기존의 완전 소성 이론에 근간한 기초의 지지력 이론과는 상당한 차이가 있다.

- 현재 접촉력 사슬의 좌굴에 대한 연구는 입자물리학을 다루는 연구자들에 의해 이론적으로 활발히 이루어지고 있다. 예를 들어 Hunt 등 (2010)은 주위 입자에 의해 구속된 접촉력 사슬을 그림 1.7과 같이 다수의 절점으로 연결된 구조체로 간주하고 좌굴을 발생시키는 에너지를 평가하여 접촉력 사슬의 붕괴를 이론적으로 예측하고 있다.



[그림 1.7] 구속된 접촉력 사슬과 좌굴에 대한 이상적인 모형 (Hunt 등, 2010). 입자 간 접촉력 사슬 구조를 트러스 요소와 이를 연결하는 스프링으로 이상화하여 접촉력 사슬의 좌굴을 모델링한다.

- 그림 1.7와 같은 자연과학 분야에서의 이론적인 연구와 함께 그림 1.6과 같은 입상체 지반에 대한 공학적 연구를 병행한다면 기존의 고전적인 소성 이론에 근간한 지반의 지지력 이론(theory of soil bearing capacity)은 크게 수정될 수 있다. 만약 기존의 지지력 이론과 다른 형태의 이론이 도출되고 건설업계에서 사용되는 지지력 공식이 큰 폭으로 수정된다면, 이로 인한 경제적 파장은 상당할 것이다.

- 하지만 접촉력 사슬 구조의 붕괴에 근간하여 지반의 지지력 공식이 새롭게 제안되기 위해서는 모형 지반이 보다 실제 지반과 가깝게 형성되어야 하며, 현재

본 연구자에 의해 제작된 소규모의 입상체에서 벗어나 대규모의 입상 지반 모형체와 보다 정밀한 하중 재하 장치 및 보다 높은 해상도를 가지는 광탄성 측정 장비가 필요한 실정이다.

2. 연구개발의 목표

■ 연구개발 최종목표

최종 연구 목표	3차원 프린팅된 비정형 입자가 적층된 대규모 모형 입상체 지반의 구축과 이를 이용한 주응력 방향 조절 재하 시험 및 광탄성 이미지 분석을 위한 장치 개발
핵심 연구 성과	- 1000개 이상의 광탄성 입자를 가지는 모형 지반과 관련 재하 장치 - 힘전달 구조의 광탄성 가시화를 이용한 주응력 분포 측정 기술 - 3차원 프린팅을 이용한 비정형 입자의 효율적 출력 기술

■ 본 연구의 최종 목표는 이론적 아이디어 및 시작품 개발에 해당됨.

■ 기존 설계 기술을 현재 사회 요구 조건을 반영하여 개선하기 위해 기초적인 연구가 이루어져야 하고, 입상체 역학에 근거한 이론적 아이디어가 도출되어 최종적으로 지반구조물의 설계 변수로 다루어져야 함.

■ 2년의 연구기간, 연간 최대 5000만원의 연구비 내에서 가능한 연구 범위는 지반 내 힘전달 구조에 대한 이론적 아이디어 도출과 광탄성 이론에 근거한 측정 장비의 시작품 개발이 합당하다고 판단됨.

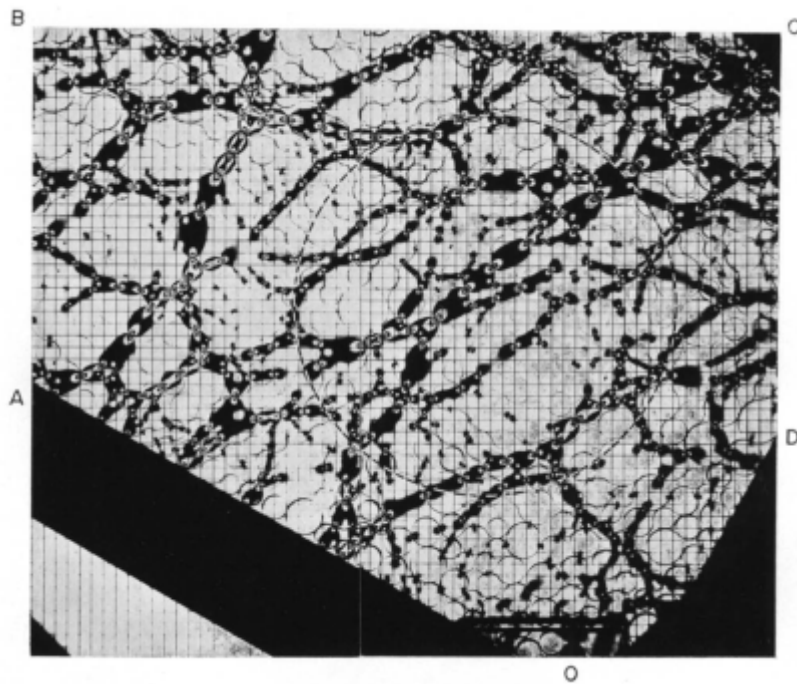
■ 제한된 연구비와 짧은 연구기간이지만 본 연구제안자에 의해 선행연구가 어느 정도 이루어진 상태이므로 집중적으로 연구가 진행된다면 설정된 최종 목표와 예상성과물을 주어진 시간에 충분히 도출할 수 있으리라 판단됨.

■ 3차원 프린팅을 이용한 비정형 광탄성 입자 출력은 본 연구제안자 소속기관의 연구실험지원센터에서 보유한 3차원 프린터(600x600x1600dpi, 16~30마이크로미터 정밀도)를 활용할 계획이므로 연구 수행시 장비 구매 등에 필요한 시간 소요를 크게 단축시키리라 판단됨.

3. 관련분야의 국내외 기술개발 현황

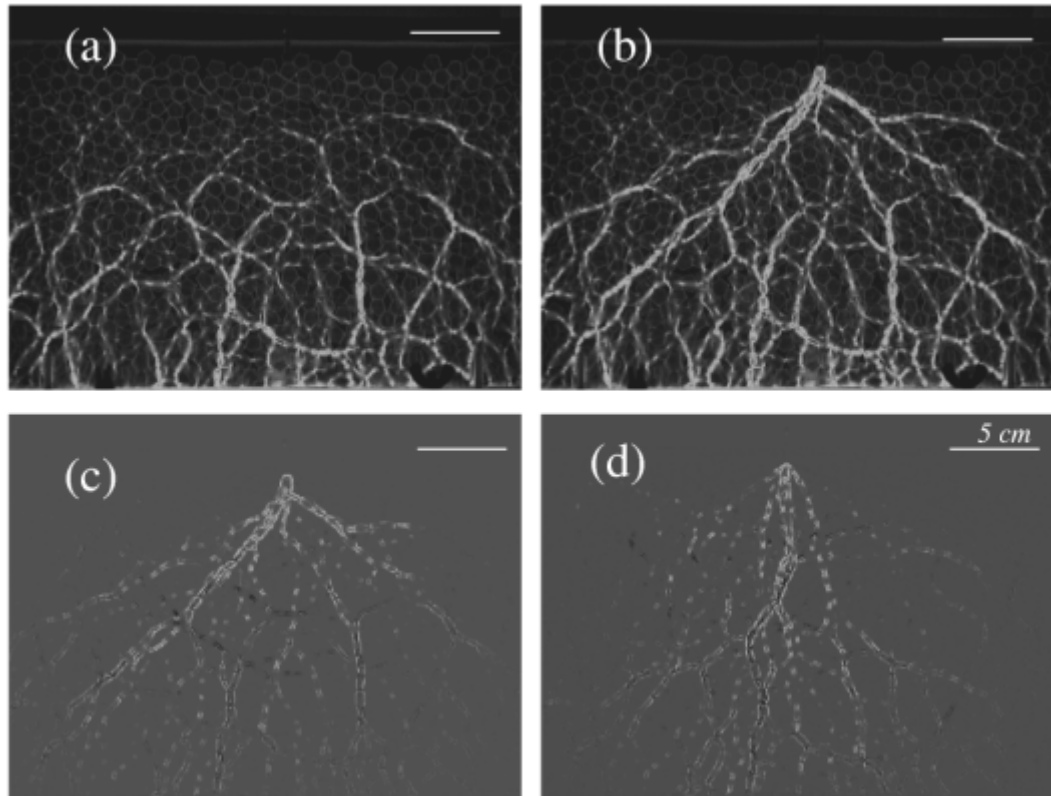
(1) 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

■ 이상적인 토립자를 표현하기 위해 다양한 재료들이 사용되었는데, 그 예로 부서진 유리조각(Allersma, 1982; Dantu, 1957; Drescher, 1976; Dyer, 1985; Wakabayashi, 1958) 또는 유리구슬(Lesniewska and Sklodowski 2005)을 사용한 예가 있다. 최근 보다 현실적인 입상체 지반을 구성하기 위해 Muir Wood와 Lesniewska (2009, 2010, 2011)는 작은 유리 구슬과 유리와 동일한 투과율을 가지는 유체를 사용하여 포화된 지반을 구성하고 편광된 빛을 투과하여 입상체 지반의 응력 전달 패턴을 조사한 바가 있다.



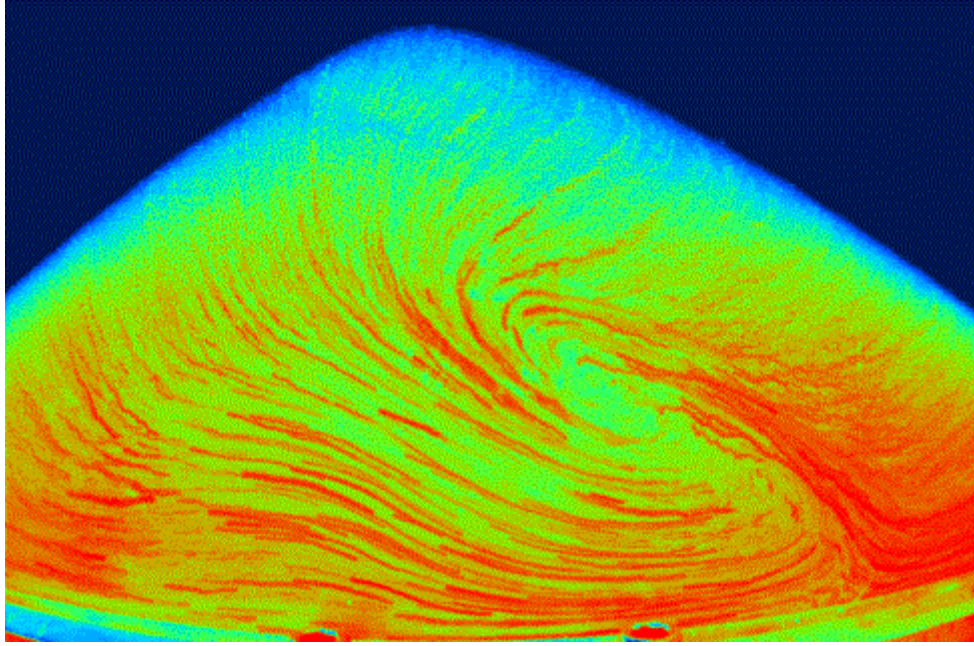
[그림 1.8] CR-39 폴리머의 원형 입자로 적층한 광탄성 이미지(Drescher and de Jong, 1972). 초기 광탄성 기법은 빛이 물체를 통과하여야 결과를 얻을 수 있으므로 입자 소재가 투명해야 한다. 따라서 폴리머 계열 또는 유리 등의 투명한 재료만 입자 재료로 사용될 수 있다.

■ 광탄성 원리가 지반공학에 처음 도입되었을 때, 원판 모양의 광탄성 디스크를 이용하여 토립자를 표현하였다(Drescher and de Josselin de Jong, 1972; Rossmannith and Shukla, 1982). 광탄성 디스크는 입상체의 힘 전달 연결고리에 대한 연구를 위해 최근 다시 사용되었다(Da Silva and Rajchenback, 2000; Howell 등, 1999a, 1999b).

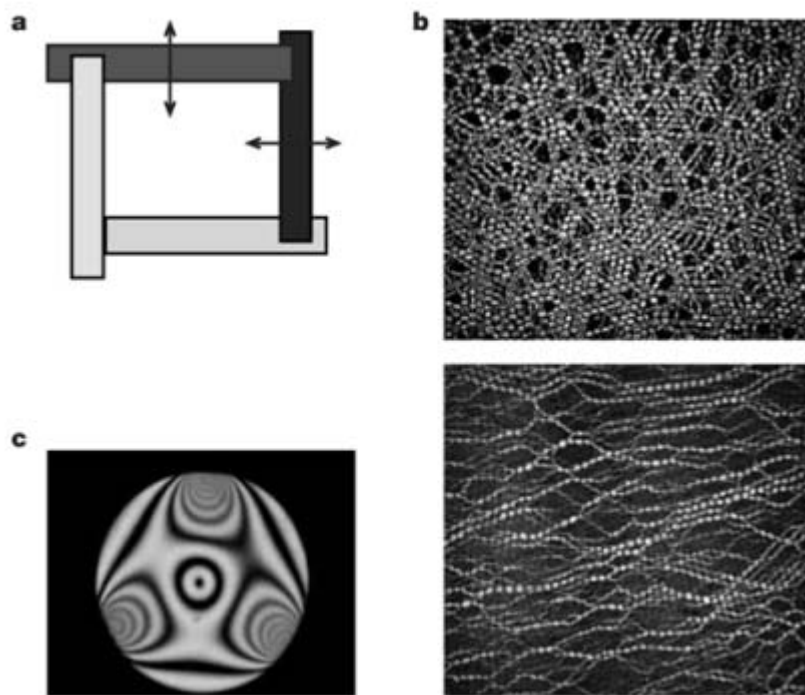


[그림 1.9] 폴리머 계열로 만든 2차원 팔각형 입자 적층 입상체에 대한 집중하중 재하 시험 결과(Geng 등, 2001). (a) 중력에 의한 힘전달 구조, (b) 중력과 집중하중이 모두 가해졌을 경우에 힘전달 구조 분포, (c) 이미지 처리를 통해 얻은 집중하중에 의한 힘전달 구조, (d) 입자 배열을 달리하였을 경우 집중하중에 의한 힘전달 구조.

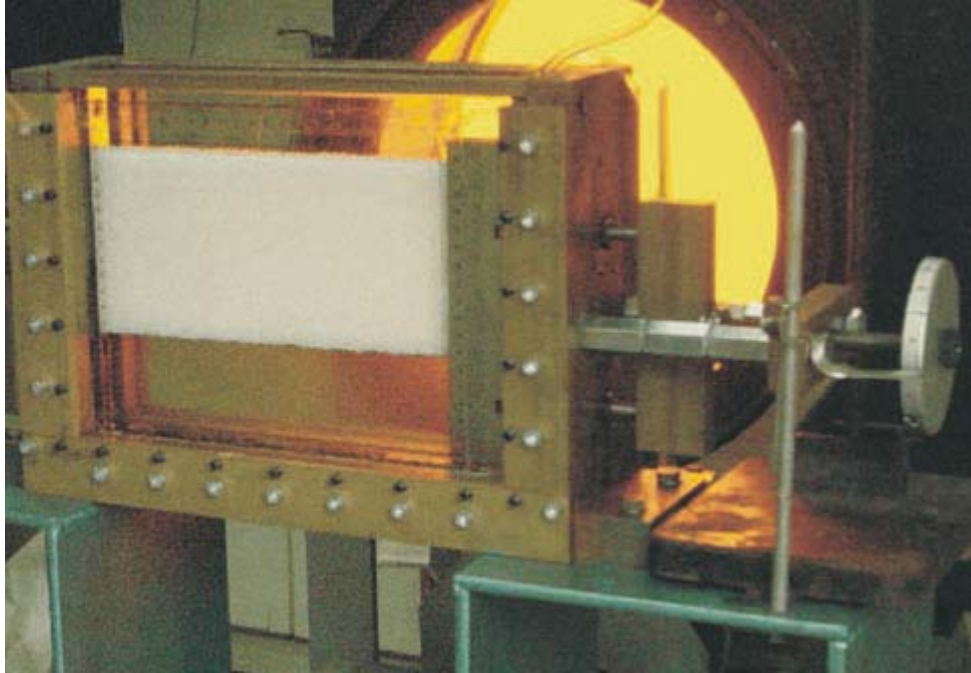
- 2000년대에 들어서 광탄성 기법을 이용하여 입상체 재료의 거동에 대해 심도 있는 연구가 진행된 것은 미국 Duke 대학 물리학과와 Behringer Group 연구팀에 의해 이루어졌다. 이 연구팀에서는 광탄성 반응이 관찰되는 폴리머 재료를 이용하여 입상체가 다양한 조건에 놓였을 때 접촉력 분포 변화를 관찰하고 있다.



[그림 1.10] 입상체에 충분히 빠른 연직 가속도를 가하게 되면 입자 접촉력의 분포는 가속도를 이겨내기 위해 마치 대류(convection)와 같은 힘분포를 일으키며 이러한 과정을 통해 입상체는 조밀하게 된다 (Behringer Group: <http://behringer.phy.duke.edu>).



[그림 1.11] 유리 알갱이 입자로 만들어진 입상체에 하중 방향을 달리하였을 경우 서로 다르게 발생하는 접촉력 사슬의 분포 형태(Majumdar and Behringer, 2005). 입자 물리학 분야에서 광탄성 기법을 이용하여 물리현상을 설명하기 위한 시도가 활발히 이루어지고 있다.

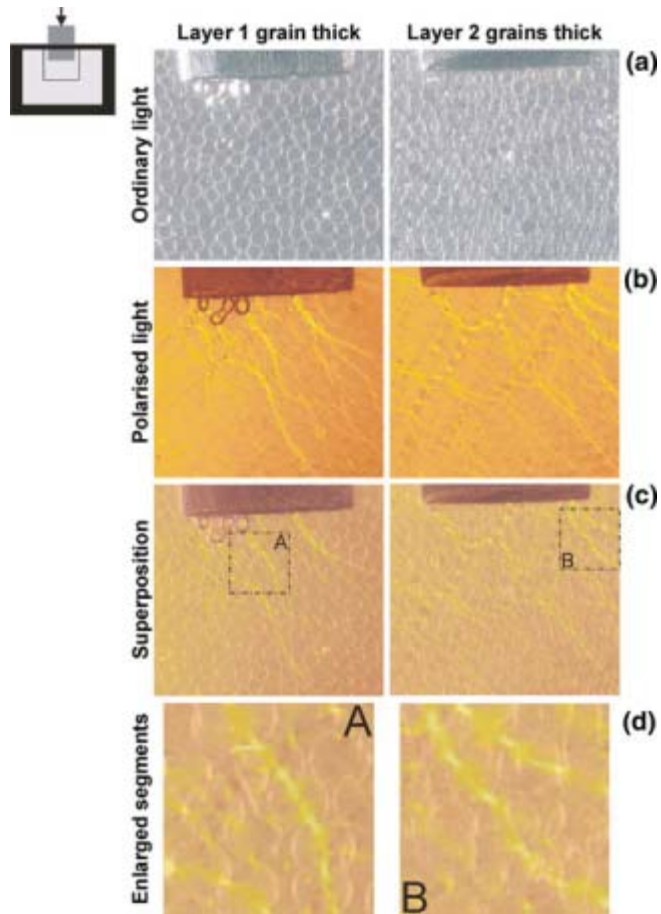


[그림 1.12] 광탄성 기법을 이용하기 위한 모형 입상체 지반의 구성(Wood and Lesniewska, 2010). 투과형 광탄성 기법을 사용하기 위해 균질한 대면적 광원이 필요하며 이를 위해 나트륨 램프를 사용하였다.

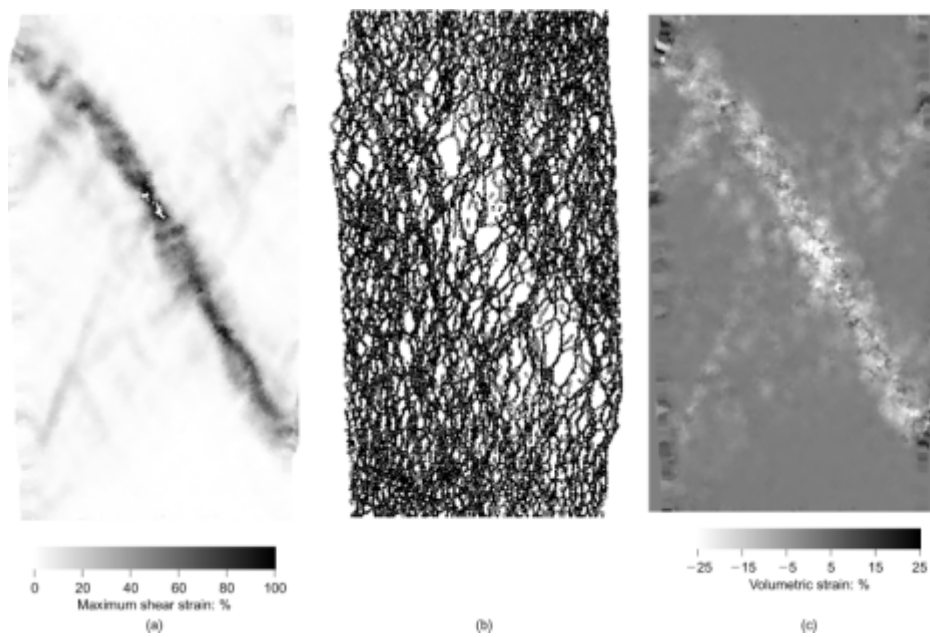
■ 입자 물리학 분야에서는 그림 1.11과 같이 주응력 방향에 따른 접촉력 사슬 구조에 대한 광탄성 측정(Majumdar and Behringer, 2005)와 함께 이를 수학적으로 표현하고자 하는 시도가 이루어지고 있다.

■ 최근 지반공학 분야에서는 보다 현실적인 입상체 지반을 구성하기 위해 Muir Wood와 Lesniewska (2009, 2010, 2011)는 작은 유리 구슬과 유리와 동일한 투과율을 가지는 유체를 사용하여 포화된 지반을 구성하고 편광된 빛을 투과하여 입상체 지반의 응력 전달 패턴을 조사한 바가 있다. 투과형 광탄성 측정 기법을 사용하기 위해 그림 1.12와 같은 대형 나트륨 램프를 사용하였다.

■ 입상체의 힘전달 구조를 이해하기 위해서 개별 요소법(discrete element method)도 최근 폭넓게 사용되고 있다. 그림 1.14과 같이 개별 요소법에서는 입자 크기 수준에서 미시역학적 거동(micromechanical response)을 다양한 방법으로 관찰할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 아직까지 대부분의 개별요소법 코드가 원형 또는 구형 입자와 같이 이상적인 형태만을 다룰 수 있으며 접촉 모델과 관련된 미시역학적 모델 변수가 불확실하다는 단점이 있다.



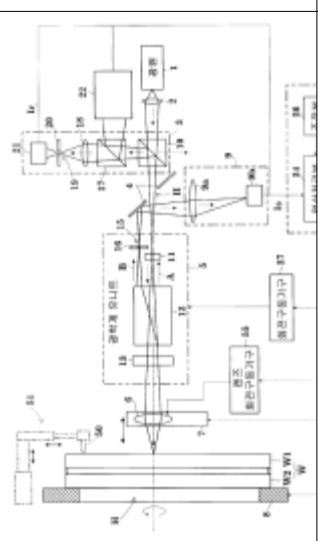
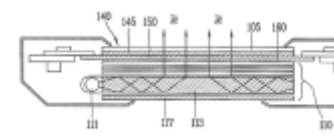
[그림 1.13] 광탄성 기법을 이용한 입자 응력의 관찰 (Wood and Lesniewska, 2010). 토립자와 유사한 투명 유리 구슬을 사용하여 지반을 구성하였다.

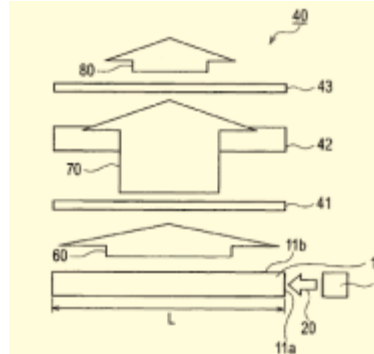
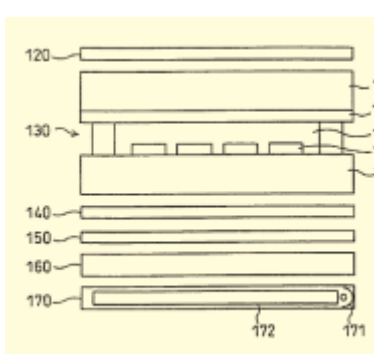


[그림 1.14] 개별 요소법을 이용한 수치해석 결과(Oda et al., 2005). 광탄성 측정 기법과 함께 개별 요소법도 입상체 역학 분야에서 폭넓게 연구되고 있다.

(2) 국내외 관련 기술 특허 동향

■ 본 연구 과제는 기초 연구이므로 특허와 직접적인 연관을 가지는 실용 기술 개발과는 거리가 있다. 하지만 광탄성 측정 장비 구성을 위한 부수적인 장치 개발에서 특허 출원이 가능하리라 예상된다. 앞서 그림 2.5에서 보인 바와 같이 투과형 광탄성 장비에서는 충분한 광원 에너지를 얻기 위해 나트륨 램프를 사용하였다. 본 연구에서는 LED 백라이트 램프를 사용하여 반사형 광탄성 장비를 구성할 계획이다. 이에 대한 특허 사항을 조사한 결과는 다음과 같다.

Keyword		광탄성 측정 장치	
검색건수		국내 특허실용: 787건, 일본: 1182건	
유효특허건수		10건 이상	
핵심특허 및 관련성	특허명	광탄성 측정방법 및 그 장치	광을 편광시키는 도광판, 이를 구비한 백라이트장치 및 액정표시소자
	등록번호	10-2009-0097164	10-2011-0077268
	보유국	대한민국	대한민국
	등록년도	2007	2011
	관련성(%)	50	50
	유사점	광탄성 측정원리를 사용함	LED 광원을 이용하고 빛을 편광시킴.
	차이점	 측정의 정밀도를 높이기 위해 편광을 편홀에 통과시켜야 함.	 패널 두께를 줄이기 위해 입사광원을 인도한 후 일측방향으로 편광시켜 액정패널로 공급하는 방식임. 하지만 현재 특허에서는 두께를 줄일 필요가 없음.

Keyword		LED backlight photoelastic	
검색건수		미국 114건, 유럽 19건	
유효특허건수		10건 이상	
핵심특허 및 관련성	특허명	Surface Light Emitting Device and Polarization Light Source	Liquid Crystal Device and Electronic apparatus using the same
	등록번호	07915802	US2002/0089622A1
	보유국	미국	미국
	등록년도	2011	2002
	관련성(%)	50	50
	유사점	LED광원을 이용하고 빛을 편광 시킴.	LED광원을 이용하고 편광판을 적층시킴
	차이점	 광원 부분은 동일할 수 있으나 편광 이미지 획득 장치 부분이 새롭게 디자인 됨.	 광원 부분은 동일할 수 있으나 편광 이미지 획득 장치 부분이 새롭게 디자인 됨.

(3) 국내외 시장분석 및 산업동향

- 광탄성 장비 및 LED 광원의 활용 기술은 국내외에서 활발하게 기술 개발되고 있으나, 대부분의 기술은 디스플레이 패널 개발을 위한 기술과 관련되어 있어, 본 연구 과제를 통해 부수적으로 개발하려고 하는 광탄성 측정 장비와는 거리가 있음.
- 본 연구과제를 통해 개발된 장치의 특허가 디스플레이 패널 분야에 간접적인 영향을 주리라 판단되지만, 장기적으로 토목건축 분야에서 입상체 뿐만 아니라 재료의 응력 분포를 가시적으로 확인하기 위해서 활용될 수 있으리라 판단됨.
- 지반구조물을 포함한 사회기반시설물의 안전성이 강조되는 현재 산업/사회적 동향을 고려할 때 구조물의 비파괴 검측이 가능한 광탄성 측정 장비의 현장 활용은 증가할 것으로 예상됨.

(4) 종합결론

	강점(S) 반사형 광탄성 측정 기법을 활용한 입상체 지반의 힘전달 구조 측정의 경험 및 인적 인프라 확보. 국내 디스플레이 부품산업의 우수성.	약점(W) 국내에서 대규모 입상체 장치 인프라 구축 경험 미흡. 입상체 역학에 대한 기술자들의 이해 부족.
기회(O) 파괴 이전 상태의 미소변형률 영역에서 지반 거동에 대한 관심과 변위 제어 중심의 설계 요구 증대	SO전략(시너지창출전략) 기 확보된 경험 및 인력, 인프라 및 부품소재를 활용하여 초기 기술개발 리스크를 줄이고, 연구결과를 통해 가시적인 설계 파라미터를 단기간에 제시함.	WO전략(보완전략) 지반설계 기술자에게 기본적인 입상체 역학에 대한 홍보 및 강의를 추진함. 파괴 이전 상태의 지반 거동의 이해를 위해서는 입상체의 거동 이해가 필수적임을 홍보함.
위협(T) 힘 전달 구조의 물리적 현상을 공학적 파라미터로 표현하는 것에 대한 신뢰성 확보	ST전략(위험최소화전략) 연구 결과를 지반공학적 설계에 직접 적용하는 것과 함께 개발된 광탄성 측정 장비가 토목구조물 비파괴 응력 검측에도 활용될 수 있도록 유도함.	WT전략(위험극복전략) Geocentrifuge와 같이 대규모 입상체 시험을 통해 해결하지 못하는 지반공학적 문제의 분석이 실험적으로 가능함을 제시함.

[그림 1.15] 대규모 모형 입상체 지반 구축과 광탄성 측정 장비 개발의 SWAT 분석

■ 파괴 이전 상태의 미소변형률 영역에서의 지반 거동에 대한 예측

변위 제어 중심의 설계 요구가 증대되는 현 시점에서 기존의 한계 평형 상태에 근간한 고전적인 지반구조물의 설계법은 한계에 도달하였음. 파괴 이전 상태에서 지반 거동을 예측하기 위해서는 토체 내부에서 발생하는 입상체 접촉력의 전달 구조를 파악하는 것이 필수적임.

■ 반사형 광탄성 측정을 이용한 입자 제작의 유연성 확대

폴리머 계열의 입자를 사용하여 투과형 광탄성 측정을 실시하고 이로부터 힘전달 구조를 측정하는 연구는 오랜 기간 이루어짐. 하지만 이러한 경우 입자 재료의 선택에 한계가 있어 보다 실제에 가까운 입자 제작이 어려워짐. 반사형 광탄성 측정 기법은 재료 선택이 자유로우므로 기존 연구보다 폭넓고 현실적인 입자를 제작하여 사용할 수 있음.

■ 대규모 모형 입상체 지반과 관련 재하 장치의 개발 필요성

물리학 분야에서 다량의 투과형 입자를 제작하고 다양한 자연현상 조건을 가하여 분석하는 연구가 활발하게 이루어지고 있음. 세계적인 연구 수준에 도달하기 위해서는 1000개 이상의 충분한 입자수로 연구를 진행해야 할 필요가 있음. 또한 다양한 공학적 문제를 적용하기 위해 주응력 방향 조절이 가능한 재하 장치의 개발이 필요함.

■ 주응력 분포 측정을 위한 광탄성 이미지 분석 및 측정장비 개발의 필요성

입상체 지반 내부의 힘전달 구조를 공학적 설계 변수로 활용하기 위해서는 주응력 분포를 나타내는 광탄성 이미지를 효과적으로 분석하는 기술이 필요함. 또한 대규모 입상체 모형 지반에서 높은 해상도의 광탄성 이미지를 얻기 위해서는 대면적 편광 조명과 광탄성 이미지 획득 장치가 개발되어야 함.

■ 지반공학적 설계 변수를 얻기 위해 현실적인 입자의 제작 필요성

연속체 역학을 바탕으로한 설계 개념에서 입상체 역학으로의 개념 전환을 위해서는 기존 설계자가 충분히 납득할 수 있을 수준의 형태를 가진 입자에 대한 연구 결과가 필요함. 이를 위해서는 원형과 같은 이상적인 형태가 아닌 실제 토립자와 같이 불규칙한 비정형 상태의 입자가 제작되어야 함. 이를 위해서 3차원 프린터를 이용하여 입자를 대량 출력하는 것이 필요함.

4. 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

- 기존의 외부 하중을 받는 지반의 경우, 하중-변위관계의 관계를 예측하는 것은 가능하였으나 지반 내부에서 나타나는 힘-전달 구조나 내부 응력의 측정은 불가능 하였다.
- 광탄성 기법을 적용한 입자로 입상체를 구성한다면 입상체 내부에 나타나는 전체의 응력 분포와 그 변화 양상을 한 눈에 파악 할 수 있다.
- 본 연구에서 개발한 광탄성 모형 입상 지반 시험체를 활용한다면 말뚝 기초, 지반 조사, 터널 등 지반-구조물 상호작용이 일어나는 모든 지반공학적 문제를 모사할 수 있다.
- 광탄성 이미지 해석을 통한 주응력 분석 기술을 이용한다면 토압론, 지지력 공식과 같은 한계평형해석에 근간한 다양한 지반공학적 문제에 대해 새롭게 평가된 주응력 분포를 활용하여 각종 식을 재구성할 수 있다. 또한 육안 확인이 사실상 불가능한 지반 아칭 효과를 광탄성 이미지로 확인할 수 있는 획기적인 기술이며 이를 통해 불확실하게 적용되었던 아칭 효과를 실제 지반구조물 설계에 적용할 수 있다.

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

1. 연구수행 전략 및 방법론

(1) 광탄성 입자로 구성된 모형 기반과 관련 재하장치 제작

- 모형 기반 구성과 관련된 추가적인 광탄성 입자 제작 범위 선정
- 다양한 재료를 이용한 광탄성 입자 제작
- 제작한 광탄성 입자의 신뢰성 및 활용 가능성 분석
- 기존 보유한 재하장치의 문제점 확인 및 보완점 작성
- 재하장치 보완의 우선순위 선정 및 범위 결정
- 하중 재하장치의 제작 및 검증
- LED 백라이트를 이용한 편광 조명장치 개발

(2) 광탄성 가시화를 이용한 주응력 분포 측정 기술 개발

- 광탄성 기법에 관련된 기존 문헌 연구
- 기존 광탄성 기법에서 나타나는 문제점 분석
- 입상체에 대한 광탄성 이미지 분석을 통한 변위-응력 통합 측정 기술 개발
- 변위-응력 통합 측정기술의 검증
- 접촉력 사슬 구조의 선형 이미지화 및 정량적 분석 기술 개발

(3) 3차원 프린팅을 이용한 비정형 입자 출력 기술 개발

- 3D 프린팅에 관련된 기존 문헌 연구
- 3차원 광탄성 입자의 형상 결정
- 카드 및 스케치업을 이용한 3차원 광탄성 입자 형상 제작
- 3차원 출력 최적화를 위한 방안 분석
- 소요 시간 내 비정형 입자의 3차원 프린팅 출력 및 검증

2. 연구수행과정 및 내용

(1) 비정형 광탄성 입자 제작

가. 원형 입자

- 실제 기반과 보다 가까운 거동을 얻기 위해 충분한 숫자로 제작된 비정형 입자를 제작
- 테프론을 이용하여 직경 10 mm, 직경 15 mm의 원형입자를 제작
- 직경 10 mm 입자 2000개 추가 제작 및 15 mm 입자 300개 추가 제작
- 원형 입자의 제작 오차 검증 (정밀 측정장치를 이용하여 표본 중 각각 20개씩 선출하여 직경 및 높이를 측정)

제작 직경 및 높이	목표 오차범위	최대 오차범위	평균 오차범위
직경 10 mm 높이 15 mm	직경	직경	직경
	90%	97%	99%
	높이	높이	높이
	90%	94%	99%
직경 15 mm 높이 15 mm	직경	직경	직경
	90%	98%	99%
	높이	높이	높이
	90%	94%	99%

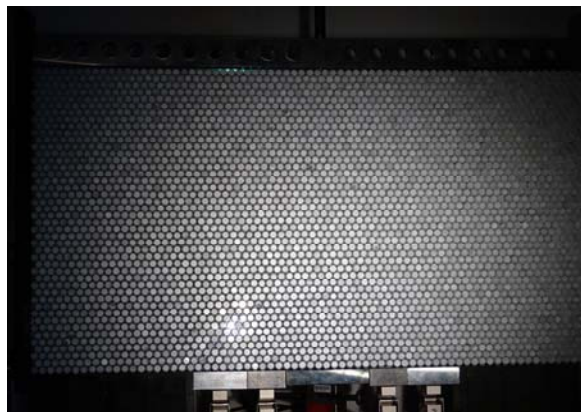
■ 테프론을 이용하여 제작한 직경 10 mm 입자의 모습



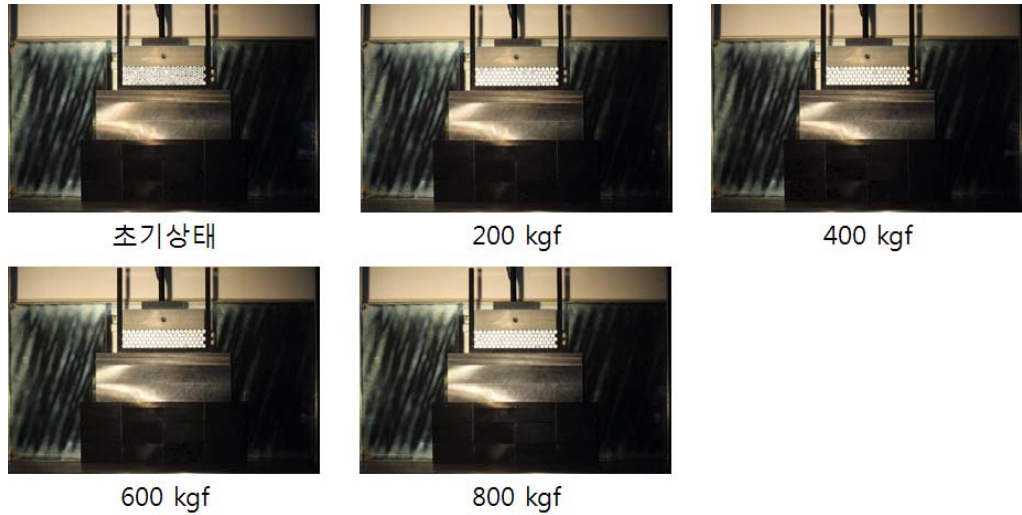
■ 테프론을 이용하여 제작한 직경 15 mm 입자의 모습



■ 제작한 직경 10 mm 입자 적층 사진 (약 3400여개의 입자 적층)



■ 원형 입자에 대한 재하 시험

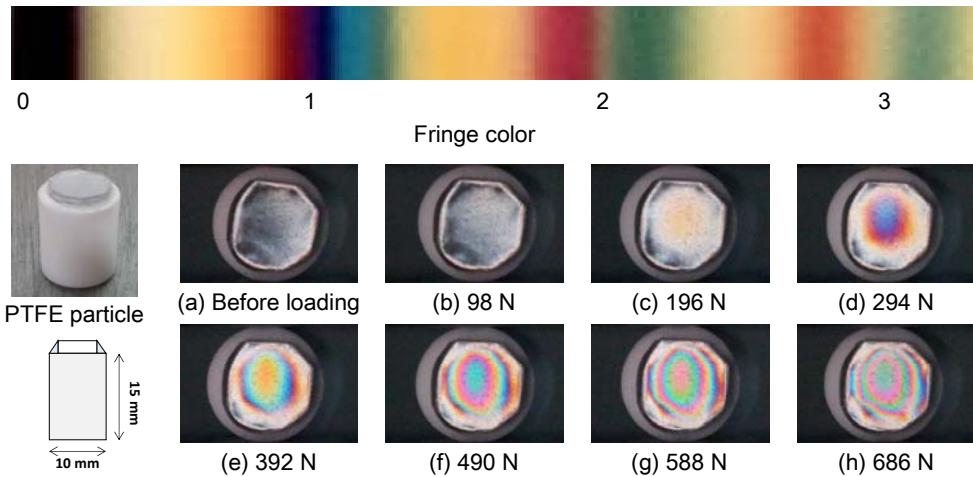


■ 단일입자의 하중단계에 따른 광탄성 패턴 확인을 위해 단일입자 재하 시험을 실시

■ 단일입자 재하 시험 전경



■ 하중 단계에 따라 나타나는 단일입자 내 광탄성 패턴 변화

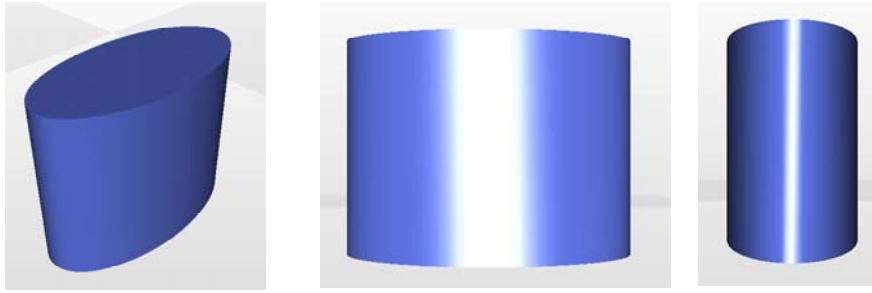


나. 3D 프린터를 이용한 타원형 비정형 입자

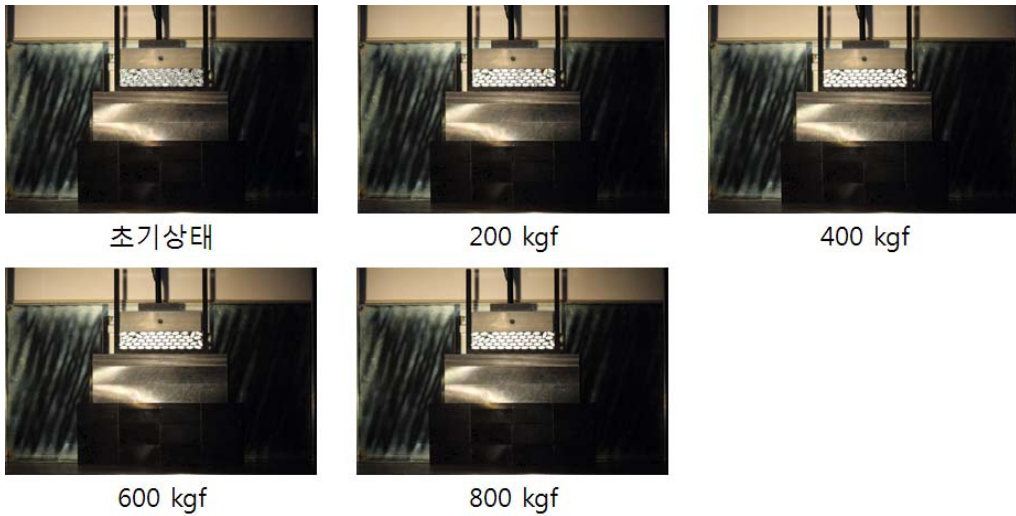
■ 다양한 비정형 입자를 제작하기 위하여 3D 프린터를 이용하여 타원형 비정형 입자를 제작

■ 장축 20 mm, 단축 10 mm, 높이 15 mm의 타원형 입자 50개 제작

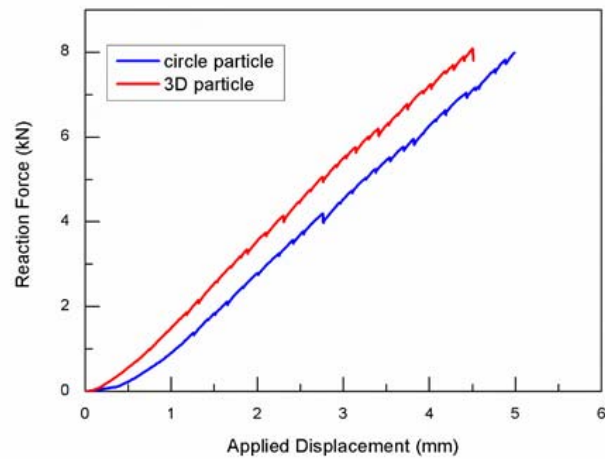
■ 도면에 입력된 타원형 비정형 입자(장축 20 mm, 단축 10 mm, 높이 15 mm)



■ 타원형 입자에 대한 재하 시험



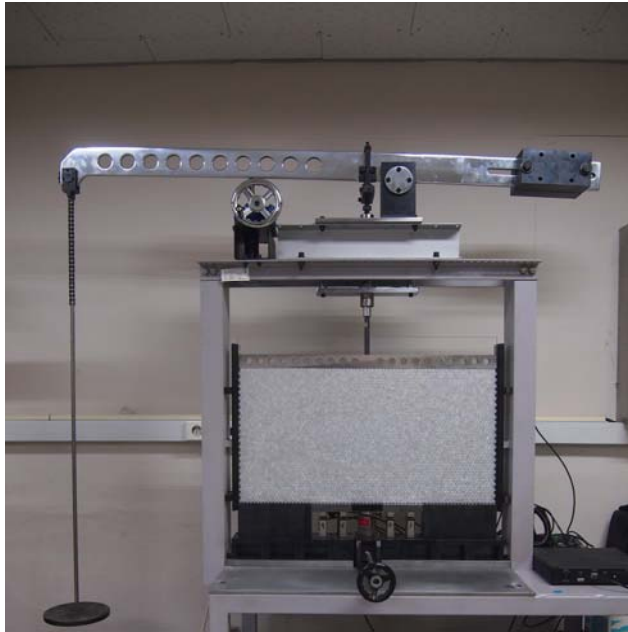
■ 타원형 입자 및 원형 입자 입상체에 대한 하중 변위 곡선



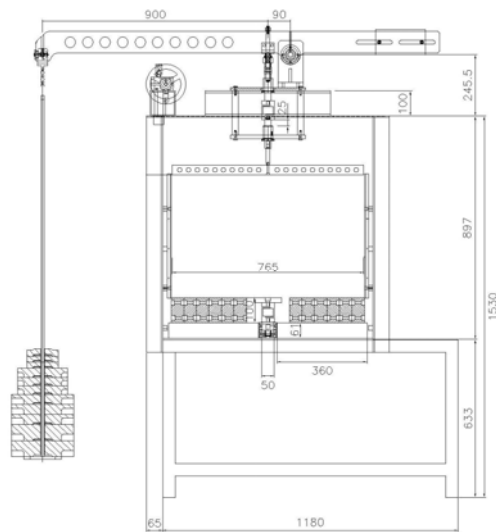
(2) 모형입자 입상체 하중재하를 위한 사하중 재하장치 제작

- 모형입자에 사하중을 재하하기 위한 10:1비의 사하중 재하장치 제작
- 기존 프레임의 크기를 확장하여 입상체의 적층면적을 확장

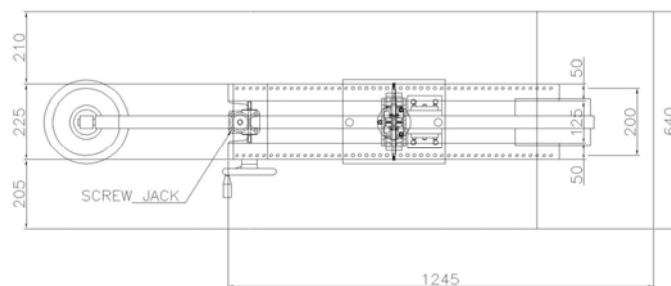
■ 제작된 전체 프레임의 사진



■ 제작된 전체 프레임의 도면

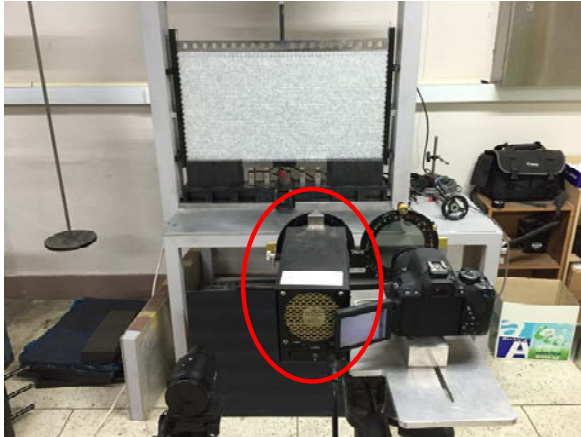


■ 제작된 전체 프레임의 상부 도면

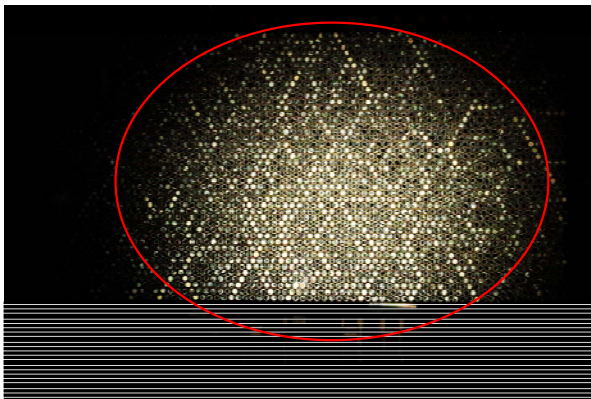


(3) 대면적 LED 백라이트 조명 개발 및 광탄성 이미지 수집

- 기존 입상체의 광원부분에 대한 집중 현상이 나타남
- 광원 주변부에서만 광탄성 패턴이 관찰됨
- 기존 광원의 크기가 작아 원형 영역 이외에 광탄성 패턴이 잘 나타나지 않음
- 대면적 LED 백라이트 사용 결과 광원의 집중현상이 거의 나타나지 않음
- 광원의 집중현상이 줄어들므로 인해 좀더 정밀한 접촉력 사슬 측정이 가능
- 기존 광탄성 사진 촬영 장비



■ 기존 입상체의 광원부분 집중 현상



- LED 백라이트를 이용한 광탄성 촬영 장비
- LED 백라이트를 이용한 광탄성 촬영 장비



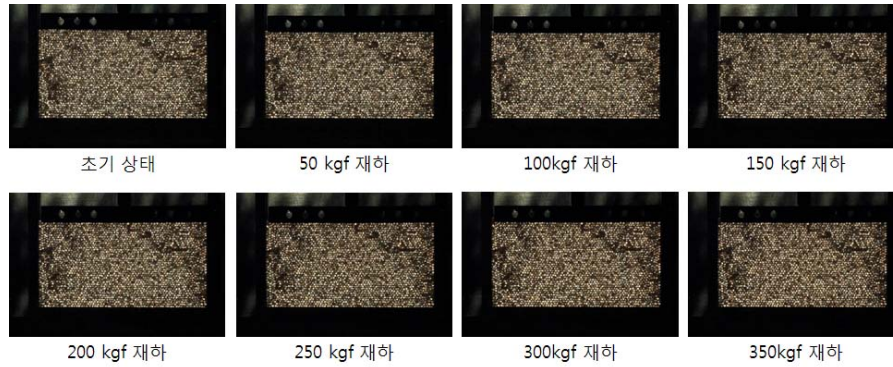
■ LED 백라이트를 이용한 광탄성 패턴 촬영사진



(4) 글라스비드 및 아크릴을 이용한 재하실험

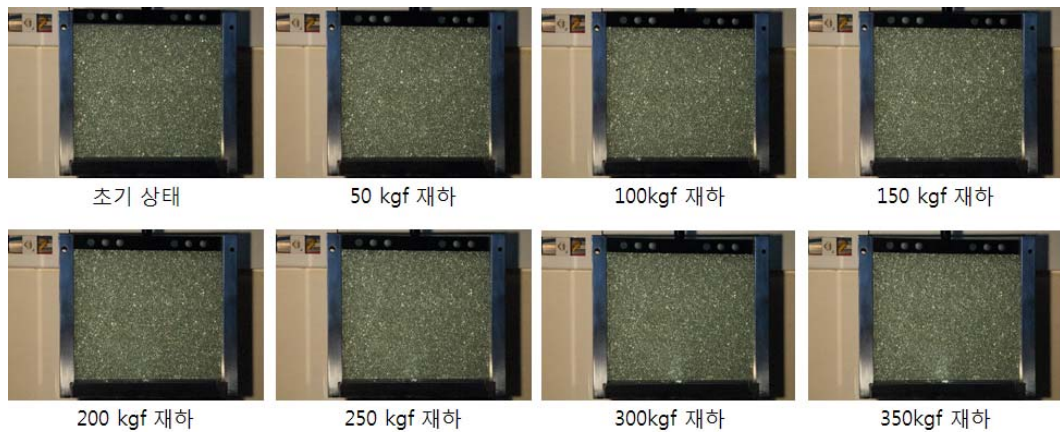
가. 3mm 아크릴봉 입자에 대한 기초 실험

- 3mm 직경의 아크릴봉을 2cm 길이로 가공한 후 적층하여 입상체 제작함
- 기존 광탄성입자를 대체할 수 있는지 확인하기 위한 실험
- 현재 광탄성 측정 장비 구성으로는 접촉력 변화를 확인하기 어려움
- 초기 상태의 이미지에서 광탄성 반응이 나온다는 점은 확인함



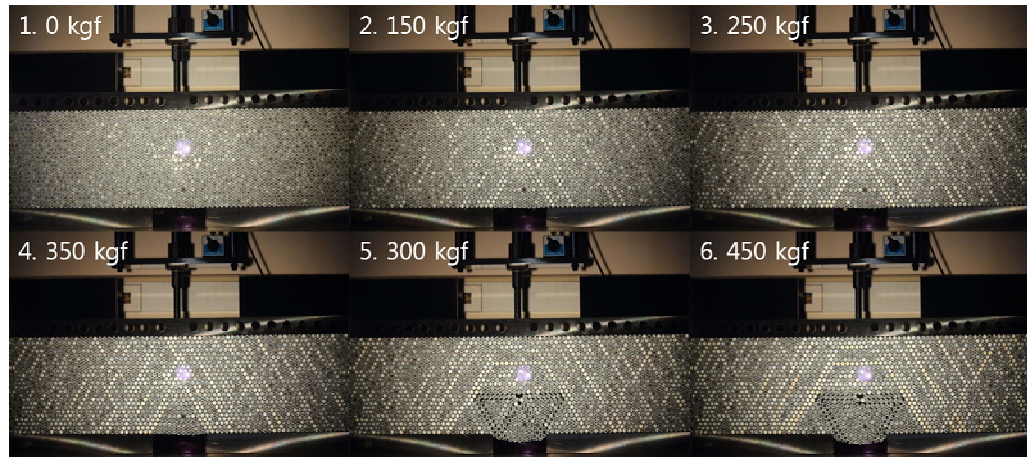
나. 글라스 비드에 대한 기초 실험

- 기존 광탄성입자 대체용으로 글라스비즈 상용제품을 사용함
- 광탄성 반응이 전혀 보이지 않음
- 재하 하중이 높을 경우 입상체의 수평력으로 인해 전면 유리 파손 발생

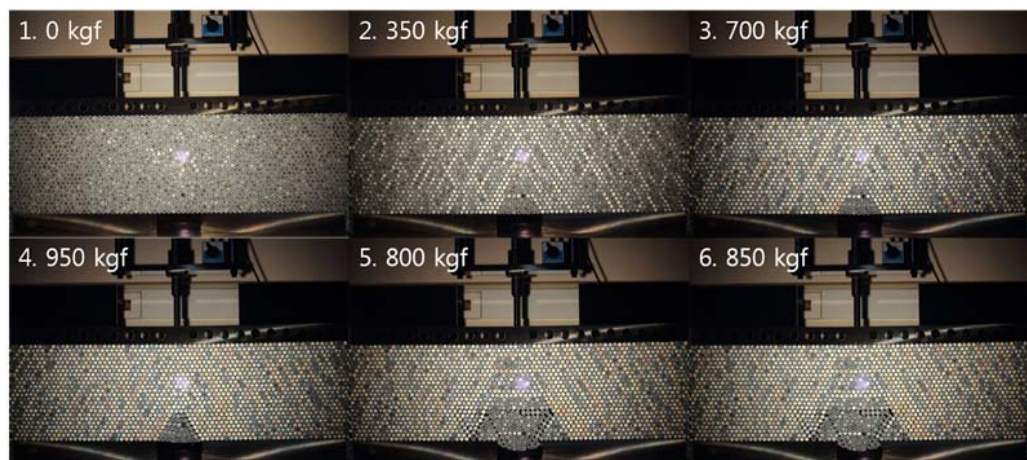


(5) 스펀지를 이용한 균질입자 입상체 트랩도어 실험

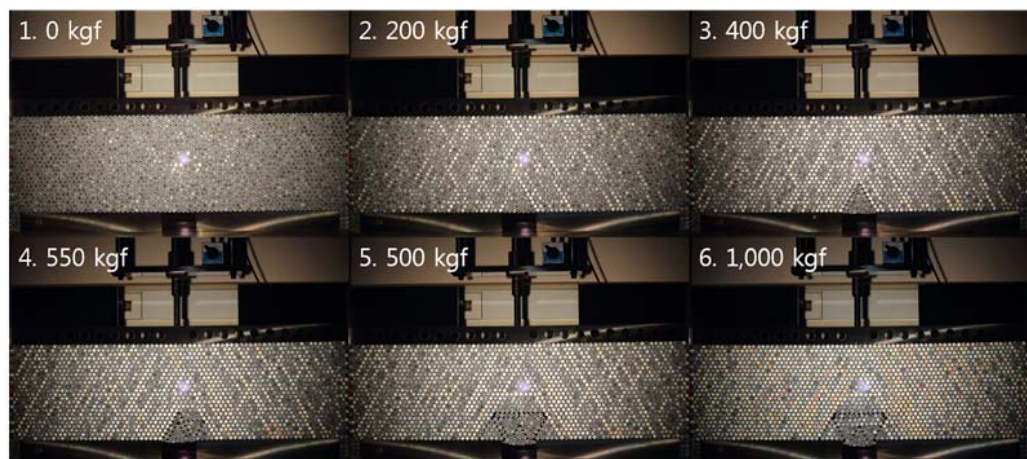
- 스펀지로 연약지반 모사, 등분포 하중재하
- 스펀지로 연약지반을 모사하여 트랩도어 변위를 제어하지 못하고, 따라서 초기 적층 상태에서도 입상체에 트랩도어의 영향이 발생함
- 트랩도어 변위에 따른 하중의 변화를 관찰하기 어려움
- 하단 트랩도어 크기 11.9cm



■ 하단 트랩도어 크기 9.8cm



■ 하단 트랩도어 크기 7.7cm

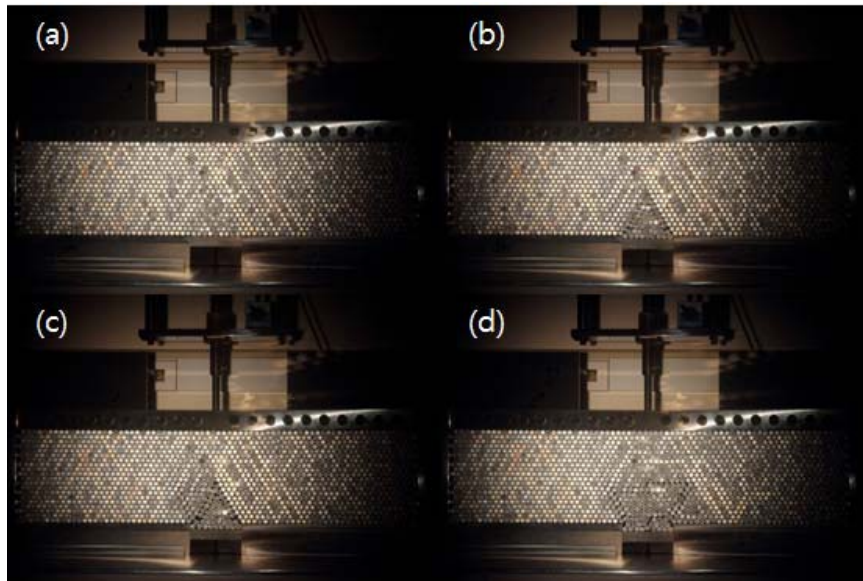


(6) 변위조절 방법을 이용한 트랩도어 실험

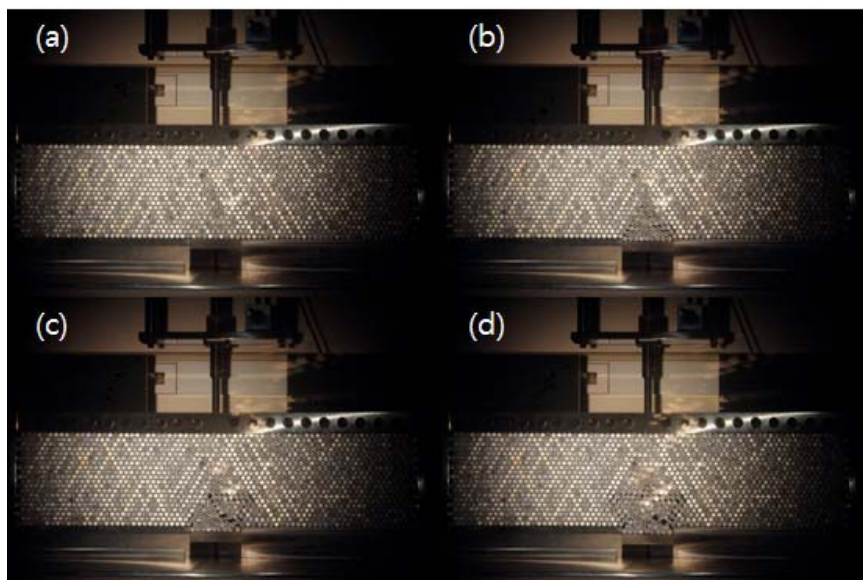
가. 균질 입자 입상체(set-A)에 대한 트랩도어 실험 (트랩도어 변위 조절)

- 트랩도어 부분에 상하로 이동가능한 장치 개발하여 적용
- 초기 입상체 적층 시 트랩도어 부분의 균질한 적층 어려움 극복
- 트랩도어 변위에 따른 입상체 거동의 변화 관찰 가능

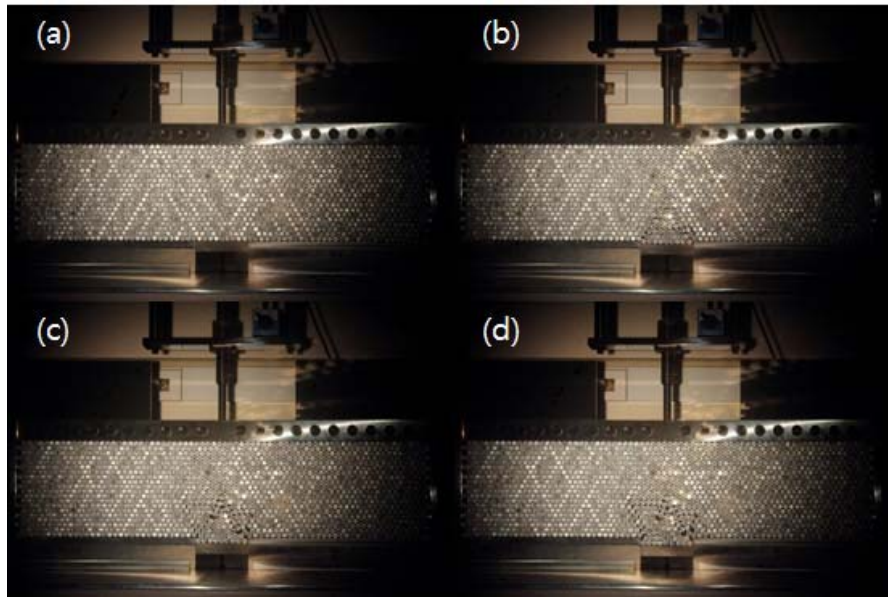
■ 초기 상재하중이 5.88kN인 경우



■ 초기 상재하중이 3.92kN인 경우

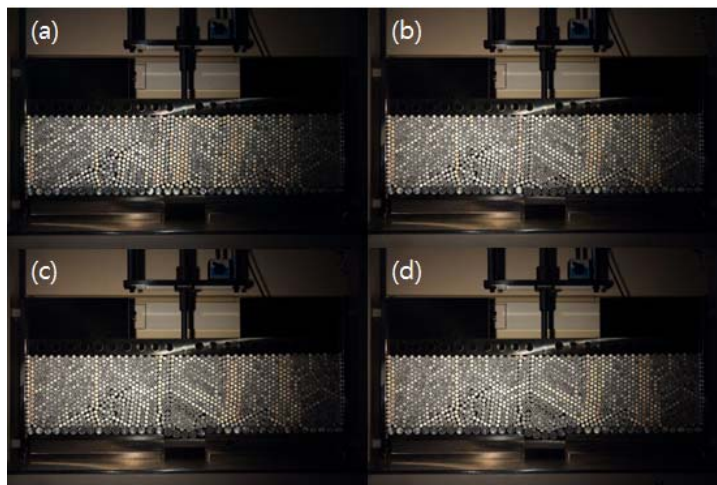


■ 초기 상재하중이 1.96kN인 경우

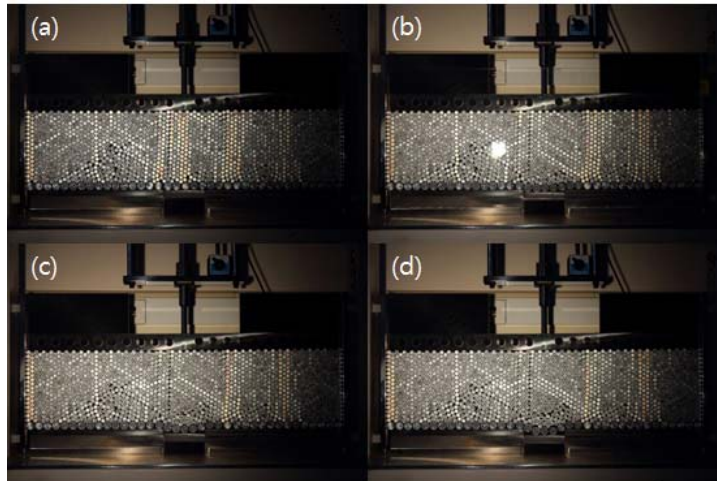


나. 비균질 입자 입상체(set-B)에 대한 트랩도어 실험

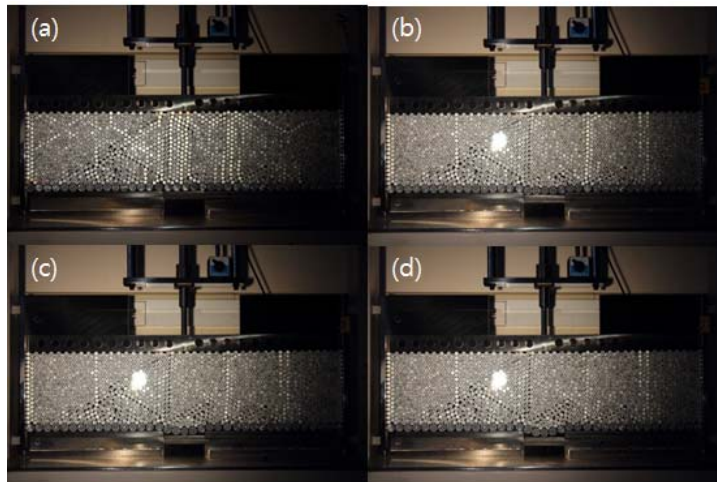
■ 초기 상재하중이 5.88kN인 경우



■ 초기 상재하중이 3.92kN인 경우



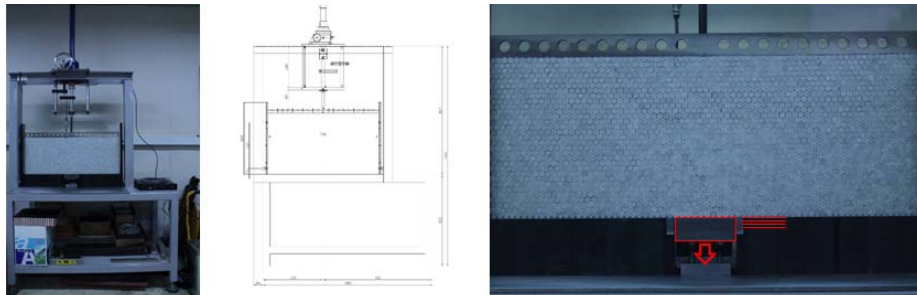
■ 초기 상재하중이 1.96kN인 경우



(7) LVDT를 이용한 트랩도어 실험

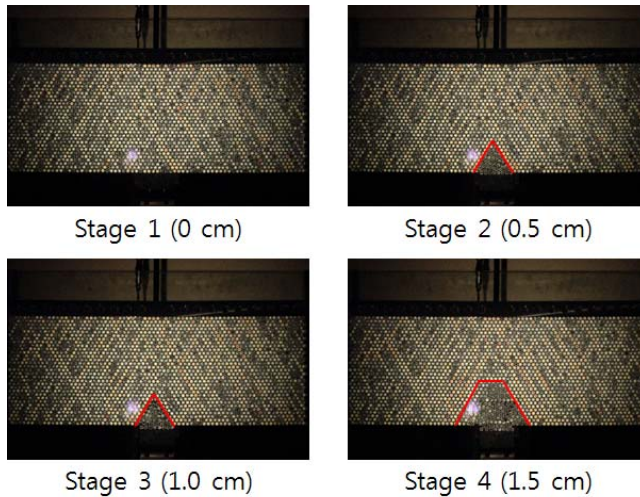
가. 균질 입상체에 대한 트랩도어 실험 (LVDT로 재하판 변위 정밀 측정)

■ 실험 장치 및 실험 방법

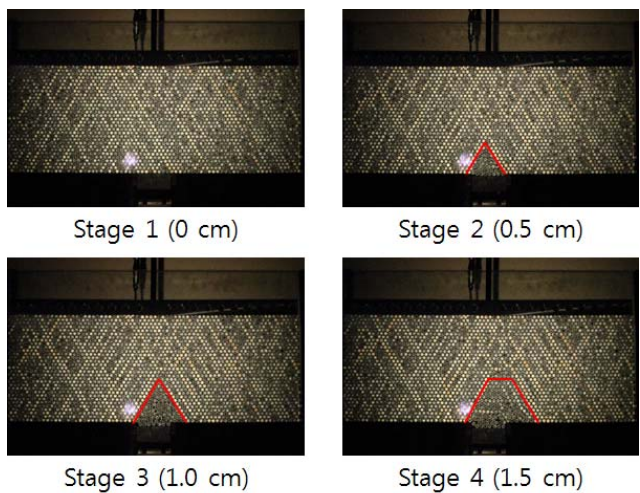


Test ID	Test #1	Test #2	Test #3	Test #4	Test #5	Test #6	Test #7	Test #8	Test #9
Trap door opening size (mm)	90	90	90	110	110	110	130	130	130
Load (kN)	7.84	5.88	3.92	7.84	5.88	3.92	7.84	5.88	3.92

■ Test #1에서 트랩도어 변위에 따른 변화 양상



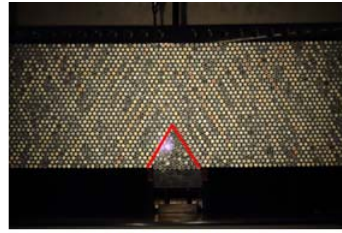
■ Test #2에서 트랩도어 변위에 따른 변화 양상



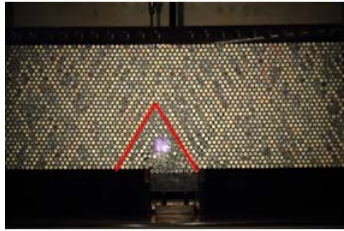
■ Test #4에 대한 트랩도어 변위에 따른 변화 양상



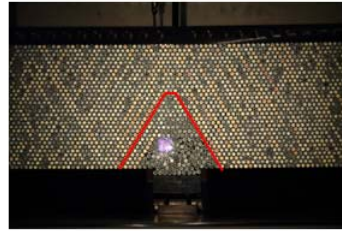
Stage 1 (0 cm)



Stage 2 (0.5 cm)



Stage 3 (1.0 cm)

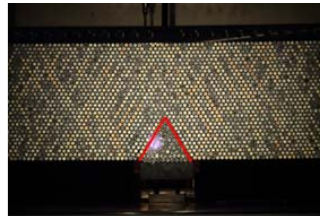


Stage 4 (1.5 cm)

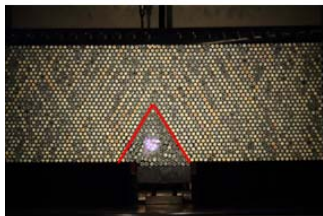
■ Test #7에 대한 트랩도어 변위에 따른 변화 양상



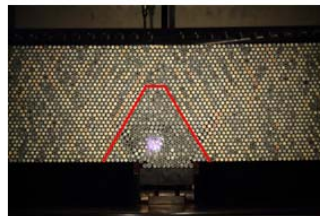
Stage 1 (0 cm)



Stage 2 (0.5 cm)



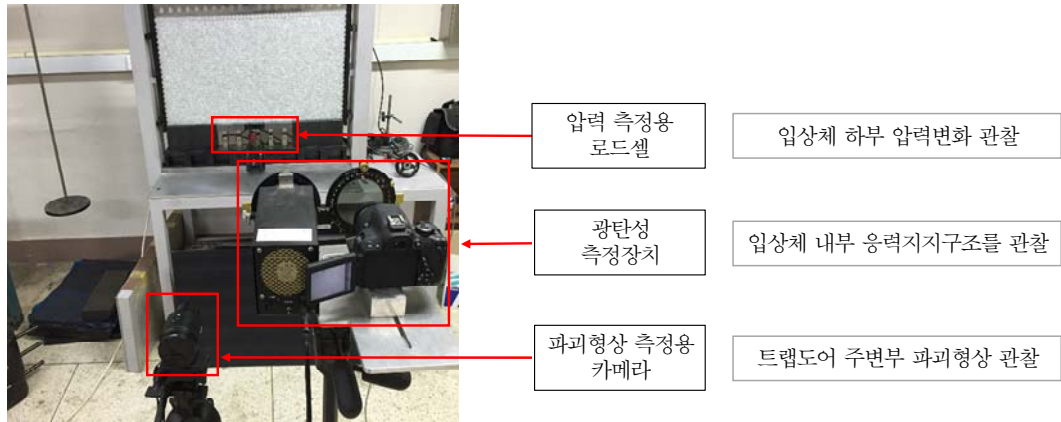
Stage 3 (1.0 cm)



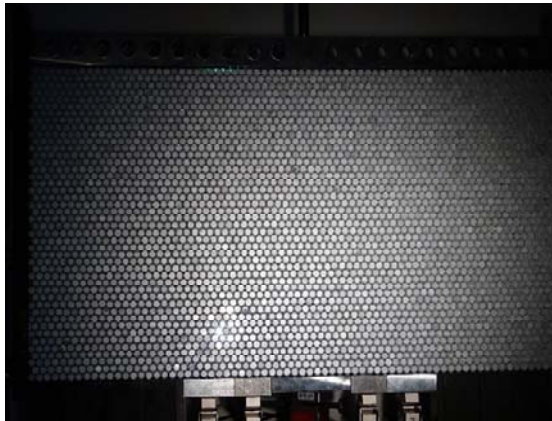
Stage 4 (1.5 cm)

(8) 로드셀과 LVDT를 이용한 트랩도어 실험
가. 균질 입상체에 대한 트랩도어 실험

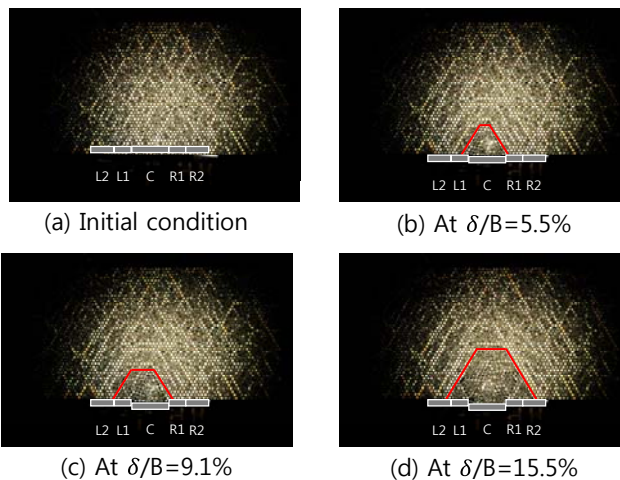
■ 트랩도어 실험장치 전경



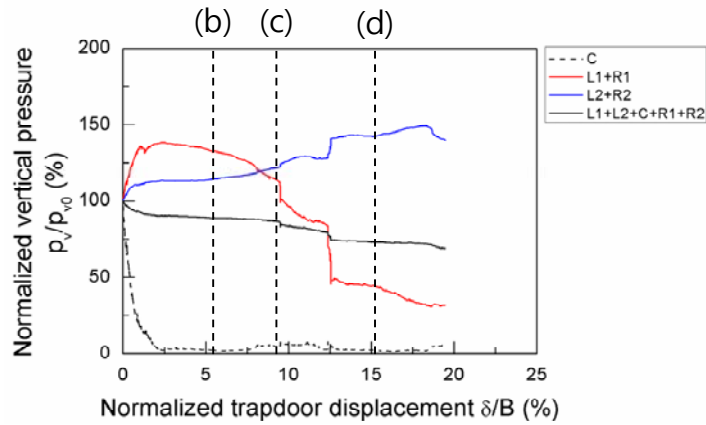
■ 균질 입상체 적층 모습



■ 균질한 상태에서 나타나는 트랩도어 하강단계에 따른 광탄성 패턴변화



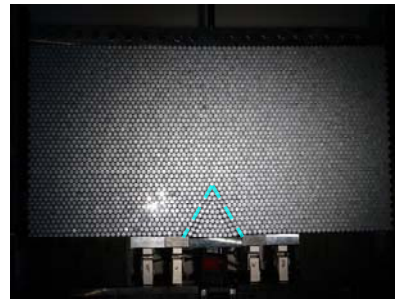
■ 균질한 상태에서 나타나는 트랩도어 하강단계에 따른 트랩도어 하부 압력변화



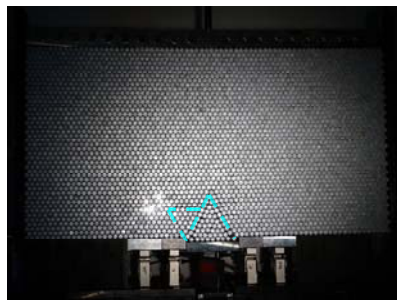
■ 균질한 상태에서 나타나는 트랩도어 하강단계에 따른 파괴형상 변화



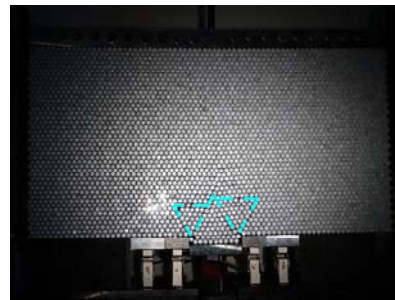
(a) Initial condition



(b) At $\delta/B=5.5\%$



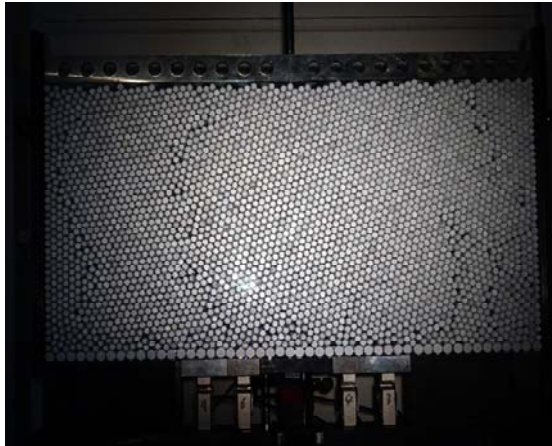
(c) At $\delta/B=9.1\%$



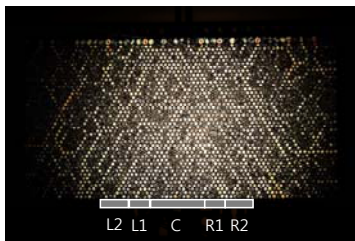
(d) At $\delta/B=15.5\%$

나. 하부에 비균질한 입자를 1층 적층한 입상체에 대한 트랩도어 실험

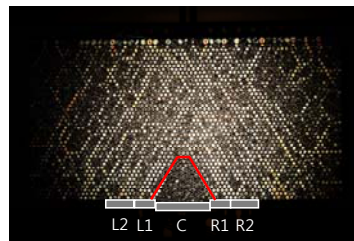
■ 하부에 비균질한 입자를 1층 적층한 입상체 적층 모습



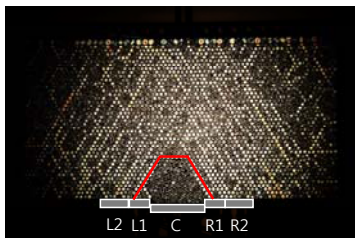
■ 하부에 비균질한 입자를 1층 적층한 상태에서 나타나는 트랩도어 하강단계에 따른 광탄성 패턴변화



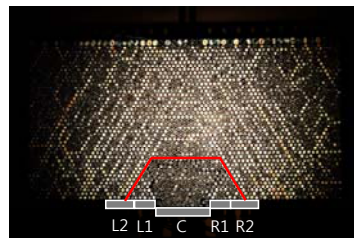
(a) Initial condition



(b) At $\delta/B=4.6\%$

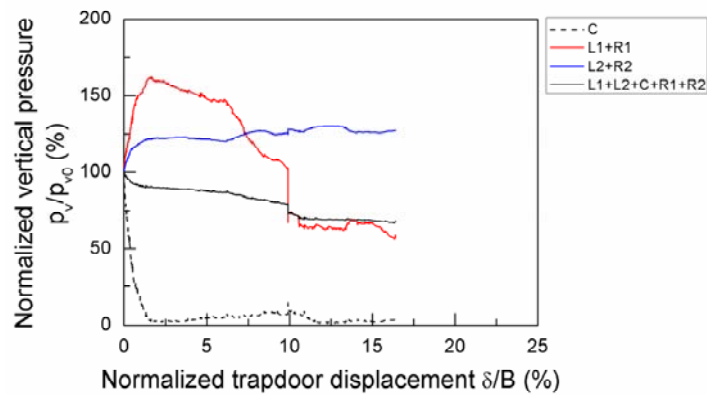


(c) At $\delta/B=7.7\%$



(d) At $\delta/B=13.1\%$

- 하부에 비균질한 입자를 1층 적층한 상태에서 나타나는 트랩도어 하강단계에 따른 트랩도어 하부 압력변화



- 하부에 비균질한 입자를 1층 적층한 상태에서 나타나는 트랩도어 하강단계에 따른 파괴형상 변화



(a) Initial condition



(b) At $\delta/B=4.6\%$



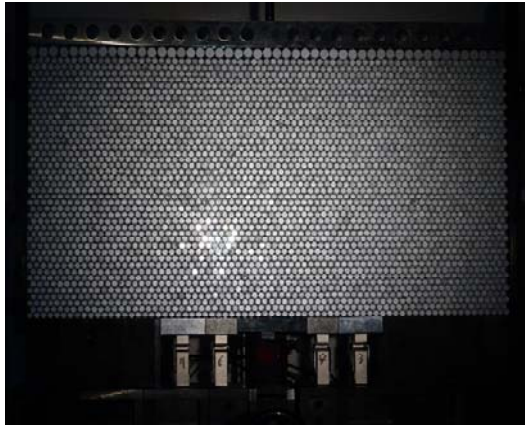
(c) At $\delta/B=7.7\%$



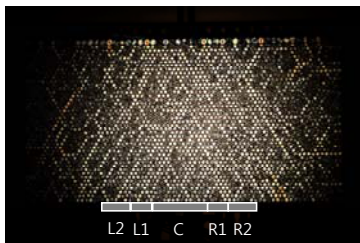
(d) At $\delta/B=13.1\%$

다. 상부에 비균질한 입자를 1층 적층한 입상체 적층 모습

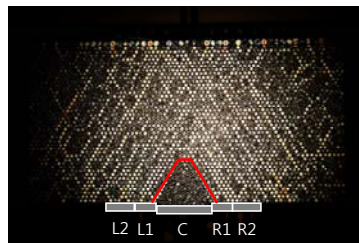
■ 상부에 비균질한 입자를 1층 적층한 입상체 적층 모습



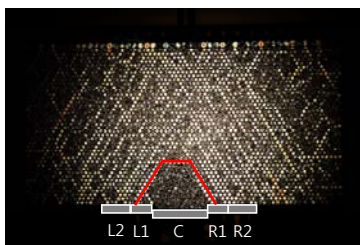
■ 상부에 비균질한 입자를 1층 적층한 상태에서 나타나는 트랩도어 하강단계에 따른 광탄성 패턴변화



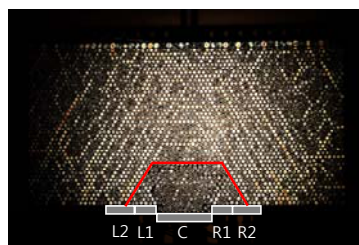
(a) Initial condition



(b) At $\delta/B=4.6\%$

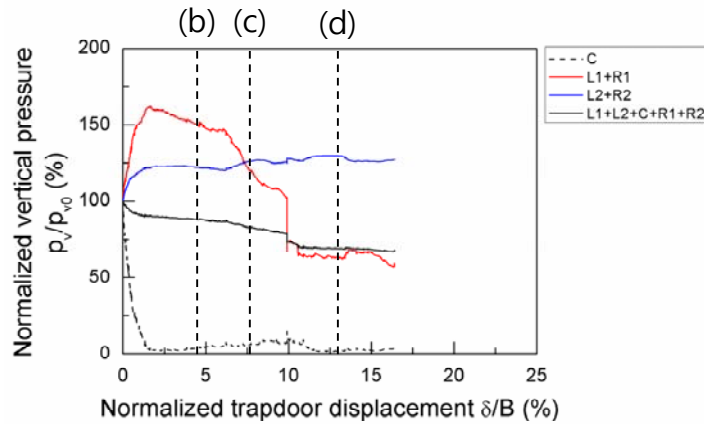


(c) At $\delta/B=7.7\%$

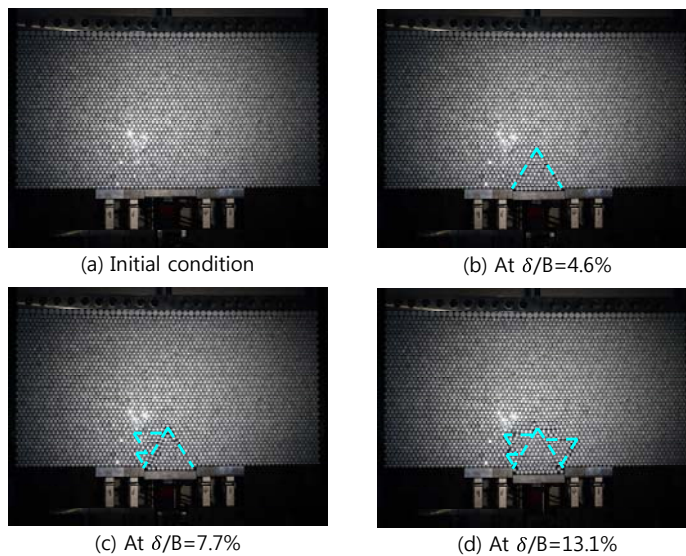


(d) At $\delta/B=13.1\%$

- 상부에 비균질한 입자를 1층 적층한 상태에서 나타나는 트랩도어 하강단계에 따른 트랩도어 하부 압력변화

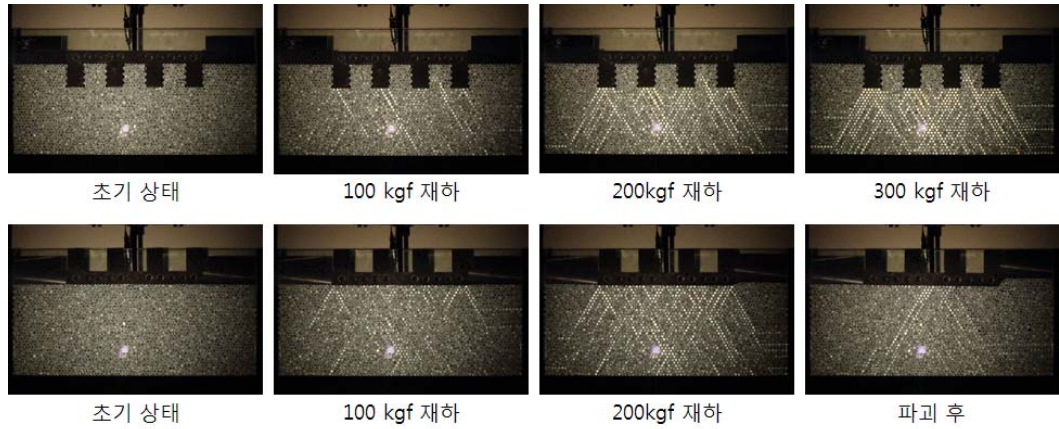


- 상부에 비균질한 입자를 1층 적층한 상태에서 나타나는 트랩도어 하강단계에 따른 파괴형상 변화

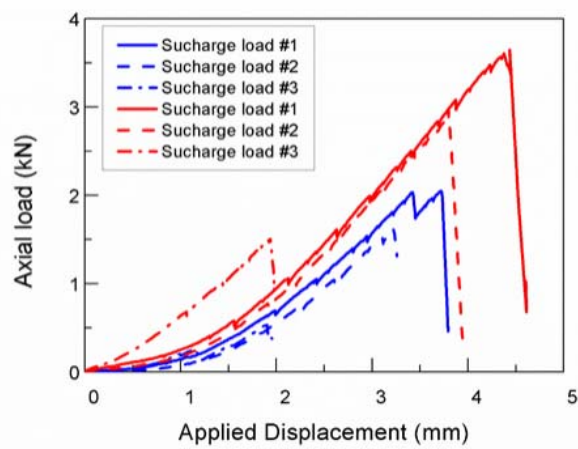


- (9) 기초 저면 형상에 따른 입상체의 응력지지구조 및 지지력 변화
 가. 기초 저면 형상에 따른 입상체 지지 거동의 차이

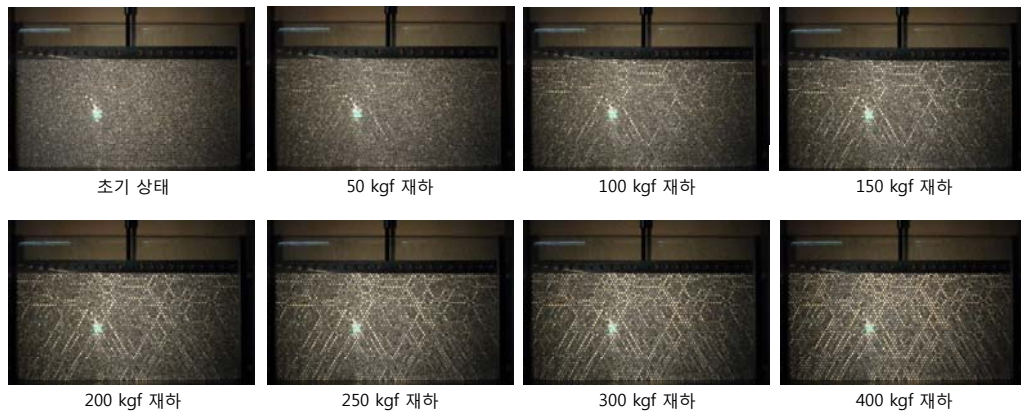
- 상재하중 33.9N 일 경우 (위: 돌기 구조가 있는 경우, 아래: 돌기 구조가 없는 경우)



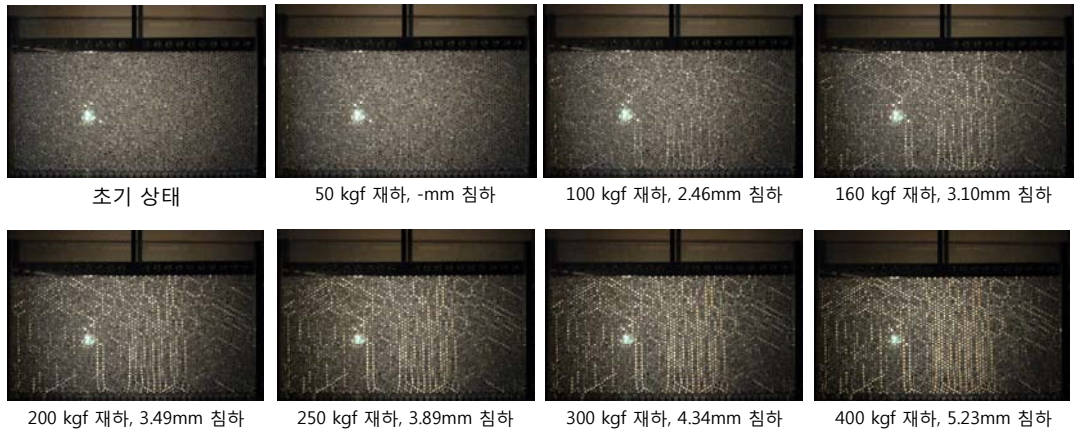
■ 하중 변위 곡선의 비교



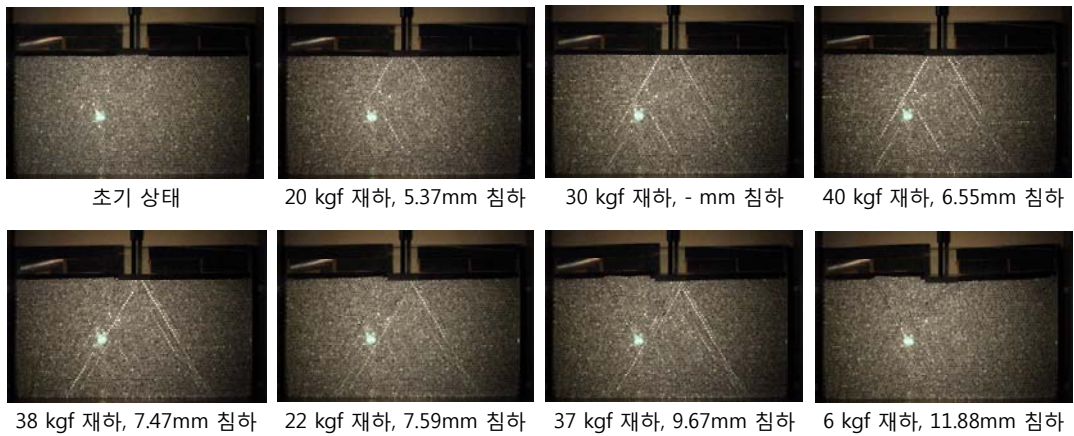
■ 균일한 입자로 적층된 상태의 일축 압축 재하 시험에서 나타난 접촉력 사슬



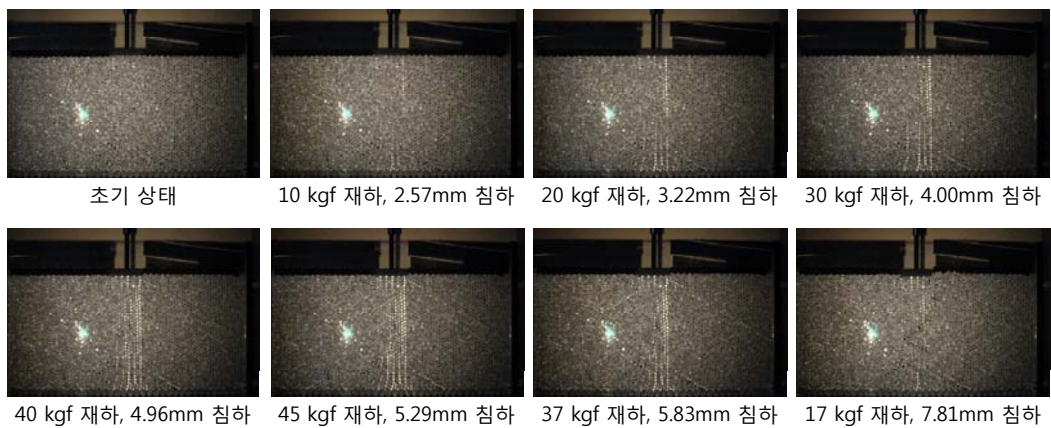
■ 비균일한 입자로 적층된 상태의 일축 압축 재하 시험에서 나타난 점축력 사슬



■ 균일한 입자로 적층된 상태의 얇은기초 실험에서 나타난 점축력 사슬 변화



■ 비균일한 입자로 적층된 상태의 얇은기초 실험에서 나타난 점축력 사슬 변화



■ 비균일한 입자로 적층된 상태의 얇은기초 실험에서 나타난 입상체 하부 공극 변화



초기 상태



10 kgf 재하, 2.57mm 침하



20 kgf 재하, 3.22mm 침하



30 kgf 재하, 4.00mm 침하



40 kgf 재하, 4.96mm 침하



45 kgf 재하, 5.29mm 침하

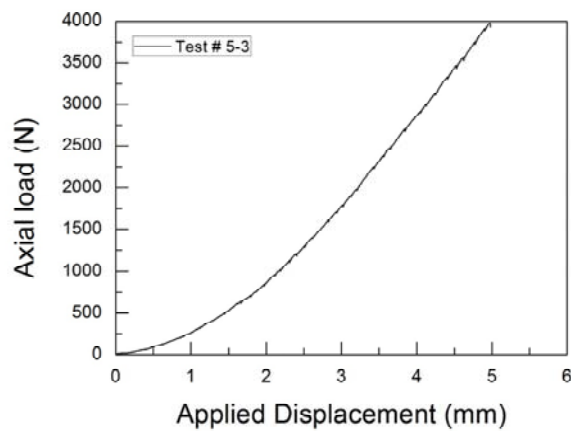


37 kgf 재하, 5.83mm 침하

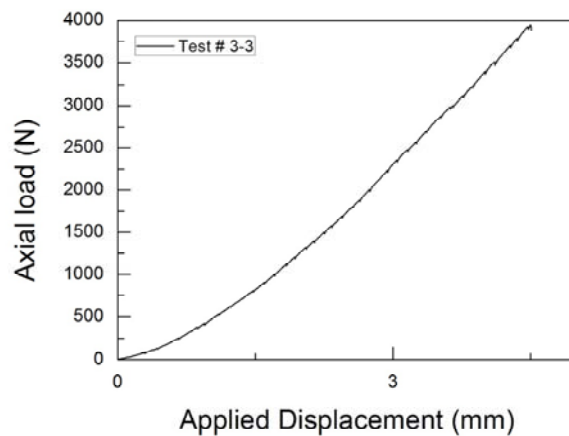


17 kgf 재하, 7.81mm 침하

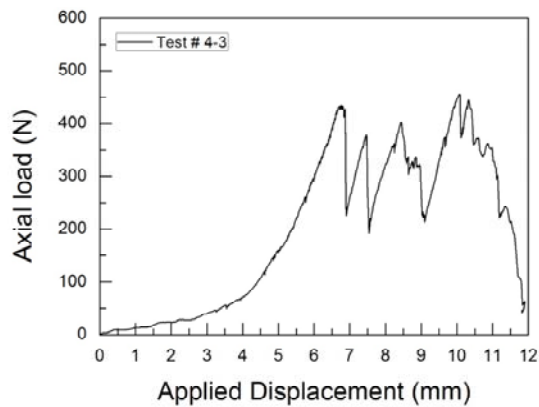
■ 균일한 입자로 적층된 일축 압축 재하 시험에서 나타난 하중 변위곡선



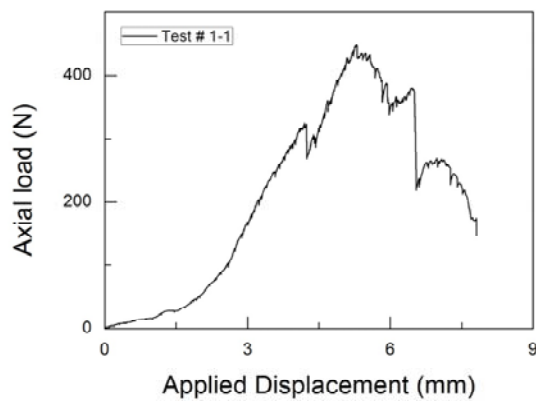
■ 비균일한 입자로 적층된 일축 압축 재하 시험에서 나타난 하중 변위곡선



■ 균일한 입자로 적층된 상태의 얇은기초 실험에서 나타난 하중 변위 곡선

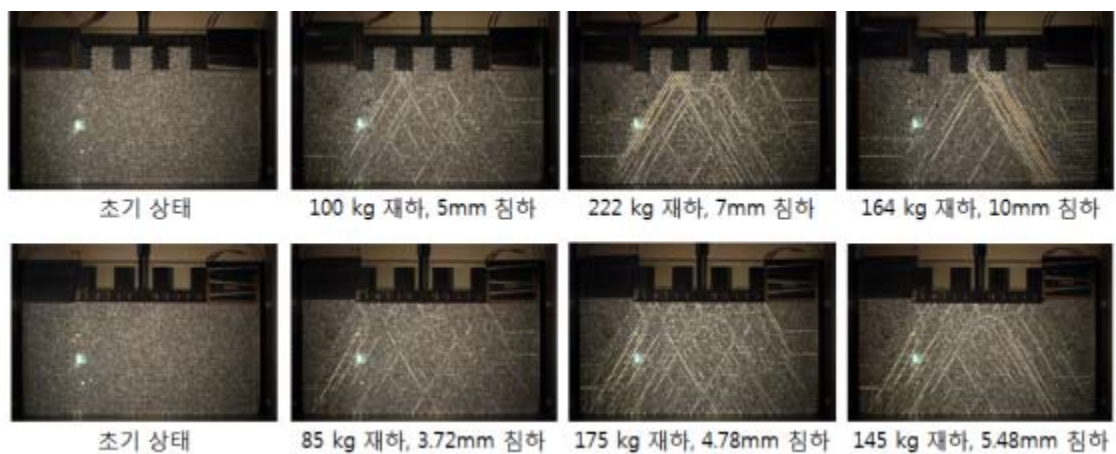


■ 비균일한 입자로 적층된 상태의 얇은기초 실험에서 나타난 하중 변위 곡선

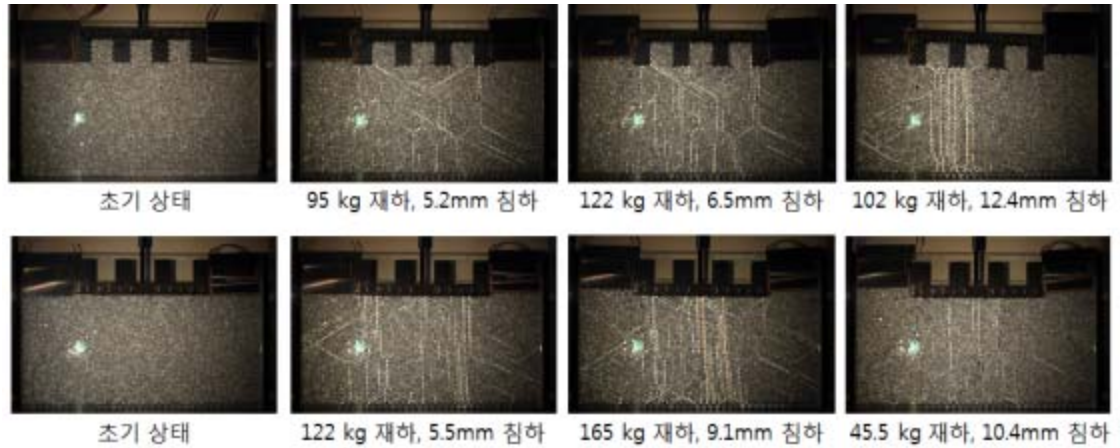


나. 기초 저면 형상에 따른 입상체 지지 거동의 차이

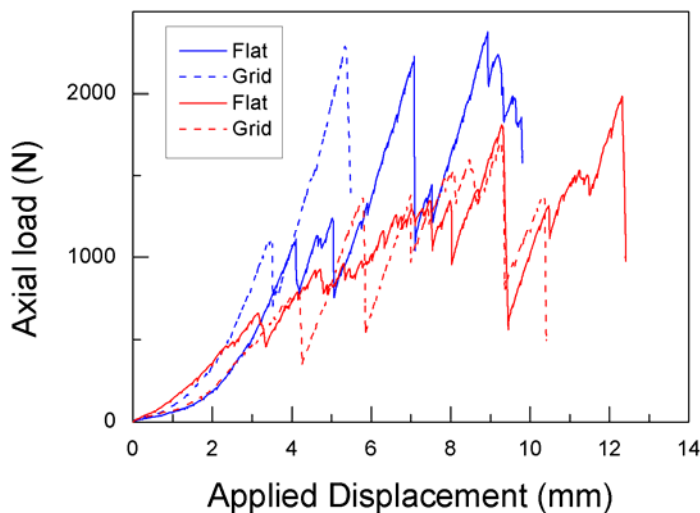
■ 균일한 입자 배열 상태 (위: 돌기 구조가 있는 경우, 아래: 돌기 구조가 없는 경우)



- 비균일한 입자 배열 상태 (위: 돌기 구조가 있는 경우, 아래: 돌기 구조가 없는 경우)



- 하중 변위 곡선의 비교



3. 연구수행결과 및 결과의 검증 방법

(1) 연구수행결과

- 다양한 직경의 1000개 이상의 비정형 광탄성 입자 제작
- 글라스 비드와 아크릴을 이용하여 광탄성 기법의 적용성 확인
- 모형 지반실험을 할 수 있는 확장된 사하중 재하장치 제작
- 대면적 LED 백라이트 조명 개발 및 광탄성 이미지 수집
- 입상체에 대한 광탄성 이미지 분석을 통한 로드셀과 LVDT를 이용한 변위-응력 통합 측정 기술 개발
- 비정형 입자 3차원 출력 기술 개발
- 트랩도어 실험과 얇은기초 실험을 이용한 모형 입상체의 신뢰성 검증

(2) 연구수행결과 검증 방법

- 비정형 광탄성 입자 제작 후 입자 제작의 정확성을 확인하기 위하여 표본을 검출하여 오차를 측정
- 비정형 광탄성 입자 제작 후 광탄성 기법을 이용하여 응력패턴 확인
- 사하중 재하장치 제작 후 로드셀을 이용하여 작용하중과 측정하중의 비교
- LED 백라이트를 이용한 조명장치 제작 후 기존 광원을 이용한 실험결과와 비교분석
- 반복시험을 이용하여 변위-응력 통합 측정 기술 개발
- 3차원 제작도면과 제작된 비정형 입자의 비교를 통한 신뢰성 확인

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

1. 최종 연구성과

- (1) 다양한 직경의 1000개 이상의 비정형 광탄성 입자 제작
 - 직경 10, 15 mm의 원형 입자와 장축 20mm, 단축 10mm의 타원형 입자 제작
 - 입자 제작 후 입자 크기의 오차율을 검토한 결과 약 99%의 오차범위 내에서 제작 완료
 - 단일입자 재하 실험 결과 각 하중단계에 따라 광탄성 패턴이 나타나는 것을 확인
- (2) 모형 지반실험을 할 수 있는 사하중 재하장치 제작
 - 모형 입자를 이용한 실험이 가능한 확장된 재하 프레임 제작
 - 10:1비의 사하중 재하장치를 이용하여 최대 1t까지 재하 가능한 재하장치 제작
 - 작용 사하중을 로드셀로 측정하여 재하 하중에 대한 신뢰성 확인
- (3) LED 백라이트를 이용한 편광 조명장치 제작
 - 대규모 광탄성 모형 지반 실험체에 적합한 대형 편광투영 조명장치 개발
 - LED 백라이트를 이용하여 넓은 면적에 균일한 조명을 작용시켜 기존에 나타났던 광원의 집중으로 인한 측정 오차 감소
 - LED 백라이트를 이용한 조명장치 제작 후 광탄성 기법을 적용하여 백라이트의 신뢰성 검증
- (4) 입상체에 대한 변위-응력 통합 측정 기술 개발
 - 로드셀과 LVDT를 이용하여 입상체에 대한 변위-응력 통합 측정기술 개발
 - 입상체 상부와 하부에 로드셀을 설치하고 입상체의 거동에 따라 나타나는 변위-응력 상관관계를 측정
- (5) 지반 아칭효과 분석을 위한 지반-구조물 접촉 모형 제작
 - 지반 아칭효과를 규명하기 위하여 트랩도어 실험장치 제작
 - 입상체 하부에 트랩도어를 설치하고 트랩도어 하강단계에 따라 나타나는 힘-전달 구조를 관찰하고 아칭효과와의 상관관계를 분석
- (6) 비정형 입자 3차원 출력 기술 개발
 - 3D 프린터를 이용하여 타원형의 광탄성 입자를 제작
 - 3D 모델링 기술을 이용하여 타원형의 광탄성 입자를 제작하고 도면과 실제

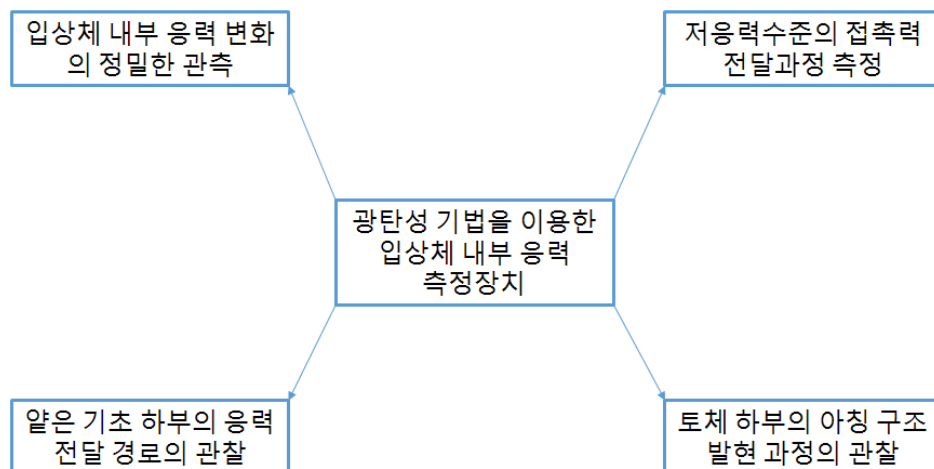
입자의 오차범위를 측정

- 3D 모델링된 비정형 입자의 광탄성 기법 적용성을 확인

2. 연구개발 적용 실적

(1) 광탄성 기법을 이용한 입상체 내부 응력측정장치에 대한 특허 1 건 출원

- 광탄성 기법을 이용한 입상체 내부 응력측정장치에 관한 것으로 광탄성 기법을 이용하여 입상체 내부 응력 지지구조를 측정하여 분석하는 장치에 관한 특허 출원
- 본 발명의 실시예에 따라 입상체 내부 응력측정장치는 입상체에 가해지는 외력의 세밀한 변화에 따른 응력분포를 보다 정밀하게 측정 가능
- 본 발명의 내용처럼 낮은 파장 영역의 빛을 이용한다면 기존에 측정 불가능했던 더 낮은 프린지차수의 측정이 가능하며 이를 이용하여 입상체 내부 응력지지구조를 보다 정밀하게 측정 가능
- 정밀한 응력지지구조와 응력분포를 측정한다면 얇은기초나 지반아칭현상, 터널주변 지반에서 나타나는 응력분포 등 지반공학의 여러분야의 문제에 대한 접근이 용이



제4장 연구목표 달성 및 효과

1. 연구개발 최종목표 달성도

구 분 개발내용	연 구 개 발 기 간								진도(%)
	1차년도				2차년도				
	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
비정형 광탄성 입자 제작	· ·	· ·	· ·	· ·					100%
주응력 방향 조절이 가능한 재하장치 제작	· ·	· ·	· ·	· ·					100%
LED 편광 조명 백라이트 개발					· ·	· ·	· ·	· ·	100%
광탄성 이미지 분석을 통한 응력 측정기술 개발	· ·	· ·	· ·	· ·					100%
접촉력 사슬구조 이미지화 및 분석 기술 개발					· ·	· ·	· ·	· ·	100%
비정형 입자 3차원 프린팅 출력 기술 개발					· ·	· ·	· ·	· ·	100%
총 달성율									100%

· · · · · 당초계획
실 적

2. 연구개발 성과의 기술적 효과분석

- 지지력 공식 변경에 의한 구조물 기초 설계 방법의 변화
- 파괴 이전 지반 변위에 대한 정밀한 예측 가능
- 토압론, 지지력 공식과 같은 한계평형해석에 근간한 다양한 지반공학적 문제에 대해 새롭게 평가된 주응력 분포를 활용하여 각종 공식을 재구성할 수 있음.

3. 연구개발 성과의 경제적 효과분석

- 입상체 기반의 지반공학 이론 정립을 통해 플랜트 기초 설계를 위한 원천기술 확보
- 중동 지역 등 건조한 기후를 가진 국가의 에너지 개발 설비시설 기초의 지지력 공식 제시 가능

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

1. 연구성과 향후 활용방안

- 본 연구에서는 3000개 이상의 입자가 적층 가능한 모형 입상 시험체를 제작하였다. 본 연구에서 제작된 모형 입상 시험체를 활용하면 말뚝 기초, 지반조사, 터널 등 지반-구조물 사이에서 나타나는 지반 공학적 문제를 모사할 수 있다.
- 광탄성 기법을 이용하여 다음과 같은 문제에 접근하면 입상체 내부에서 나타나는 힘-전달 구조와 하중-변위 관계를 확인 할 수 있으며 이를 이용하여 기존의 한계평형 해석에 근간한 지반공학적 문제에 대해 주응력 분포를 활용하여 각종 식을 재구성 할 수 있다.
- 3차원 프린팅 기술은 많은 분야에서 비정형성을 가진 사물을 생산하기 위해 사용되고 있다. 본 과제에서는 3차원 프린팅 기술을 이용하여 비정형 입자를 제작하였지만 지반 표면의 불규칙성을 모사해야 하는 모든 토목부재 및 재료 제작에서 폭 넓게 활용될 수 있다.
- 말뚝 기초, 터널 등 지반-구조물의 거동이 일어나는 지반공학적 구조물의 설계 변수를 입상체 역학에 근거하여 설계 할 수 있고, 광탄성 입상 지반 시험체와 비교하여 실제 지반에서 지반구조물의 거동에서 나타나는 응력분포를 예측하고 이를 실제 지반구조물 설계에 적용할 수 있다.

2. 추가연구 필요성

- 본 연구에서는 3차원 프린팅 기술을 이용하여 타원형의 비정형 입자를 모사한 후 활용가능성에 대하여 분석하였다. 추가적으로 3차원 프린팅 기술을 이용하여 마찰력이나 다양한 입자의 형태를 고려하여 비정형 입자를 제작한다면 조금 더 현실에 가까운 지반을 모사할 수 있다.
- 본 연구에서는 모형 입상 시험체를 제작하였고 이를 이용하여 트랩도어 실험과 얇은기초 실험을 실시하였다. 트랩도어 실험과 얇은기초 실험에서 모형 입상 시험체의 신뢰성을 검증하였으며 입상체 내부에 나타나는 힘-전달 구조와 응력패턴을 관찰하였다. 추가적으로는 터널이나 말뚝 기초를 모사하고 지반-구조물 사이에 나타나는 힘-전달구조를 추가적으로 관찰한다면 실제 설계에 필요한 인자를 구할 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

1. 김성수, 목영진, 정영훈(2011), “모형시험과 수치해석을 이용한 조적식 석축옹벽의 거동 특성”, 한국지반공학회는문집, 제 27권, 제 9호, pp. 25-36.
2. 문창열, 김희동 (2004), “탄소봉을 이용한 연성 매설관에 작용하는 상재하중에 대한 연구”, 한국지반환경공학회 학술발표회논문집, pp. 305-316.
3. 변보현, 정영훈, 목영진(2012), “광탄성 원리를 이용한 지반 내 응력 패턴 해석”, 2012 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 1724-1733.
4. 변보현, 정영훈, 목영진(2012), “토목섬유-흙 경계면 힘 전달 측정을 위한 반사형 광탄성 측정 기법”, 2012 한국토목섬유학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 67-72.
5. 정영훈, 변보현, 목영진(2012), “얇은 기초 하중을 받는 입상체 지반의 응력분포 측정을 위한 광탄성 기법의 적용”, 2012 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 342-351.
6. 최명진 (1992), 편심하중 작용시 탄소봉 모형실험을 통한 기초의 극한지지력에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교
7. 권오균 (1997), “탄소봉 모형실험을 이용한 수직앵커판의 지지력 해석”, 산업기술 연구소논문보고집, Vol. 19, No. 2, pp. 141-147.
8. 채현식, 김홍택, 박사원, 신진택, 신방웅 (2000), “탄소봉 실험을 이용한 조립토 piled raft 기초의 거동연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 189-192.
9. Allersma, H. G. B., (1982), “Determination of the Stress Distribution in Assemblies of Photoelastic Particles”, Exp. Mech., Vol. 22, No. 9, pp. 336-341.
10. Budwig, R., (1994), “Refractive Index Matching Methods for Liquid Flow Investigations”, Exp. Fluids, Vol. 17, No. 5, pp. 350-355.
11. Da Silva, M. and Rajchenback, J., (2000), “Stress Transmission Through a Model System of Cohesionless Elastic Grains,” Nature (London), Vol. 406, No. 6797, pp. 708-710.
12. Dantu, P. (1957), “Contribution to the Mechanical and Geometrical Study of Crushed Media”, Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12-24 August, Butterworth, London, pp. 144-148.
13. Dijkstra, J. and Broere, W. (2010), “New Method of Full-Field Stress Analysis and Measurement Using Photoelasticity”, Geotechnical Testing Journal, Vol. 33, No. 6, pp. 469-481
14. Drescher, A. and de Josselin de Jong, G., (1972), “Photoelastic Verification of a Mechanical Model for the Flow of a Granular Material”, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 20, No. 5, pp. 337-340.
15. Drescher, A., 1976, “An Experimental Investigation of Flow Rules for Granular Materials Using Optically Sensitive Glass Particles,” Geotechnique,

- Vol. 26, No. 4, pp. 591-601.
16. Dyer, M. R., 1985, "Observation of the Stress Distribution in Crushed Glass with Applications to Soil Reinforcement", Ph.D dissertation, Magdalen College, Oxford.
 17. Howell, D. W., Behringer, R. P., and Veje, C. T., 1999b, "Fluctuations in Granular Media," *Chaos*, Vol. 9, No. 3, pp. 559-572.
 18. Howell, D., Behringer, R. P., and Veje, C., 1999a, "Stress Fluctuations in a 2D Granular Couette Experiment: A Continuous Transition," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 82, No. 26, pp. 5241-5244.
 19. Lesniewska, D. and Sklodowski, M., 2005, "Photoelastic Investigation of Localization Phenomena in Granular Materials," *Proc., Int. Conf. on Powders and Grains*, 18-22 July, Stuttgart, Germany, pp. 69-72.
 20. Rossmannith, H. P. and Shukla, A., 1982, "Photoelastic Investigation of Dynamic Load Transfer in Granular Media," *Acta Mech.*, Vol. 42, No. 3-4, pp. 211-225.
 21. Standing, J. R. and Leung, W. Y. M. T., 2006, "Investigating Stresses Around Tunnels and Piles Using Photo-Elasticity Techniques", *Proceedings of the Fifth International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Amsterdam, The Netherlands, 2005, pp. 171-177.
 22. Vishay, INC. (2011), *LF/Z-2 Reflection Polariscopes Instruction Manual*
 23. Vishay, INC. (2012), *PhotoStress Coating Materials and Adhesives*, <http://www.vishaypg.com/docs/11222/pscoat.pdf>
 24. Vishay, INC. (2012), *Introduction to Stress Analysis by the PhotoStress Method*, http://www.vishaypg.com/docs/11212/11212_tn.pdf
 25. Wakabayashi, T., 1958, "Photoelastic Method for Determining of Stress in Powdered Mass," *Proceedings of the Seventh Japanese National Conference on Applied Mechanics*, Tokyo, Japan, pp. 153-158.
 26. Jung, Y.-H., Byeon, B.-H., Mok, Y.-J. (2012) "Photoelastic Visualization of Stress Distribution in Particle Assembly under Elastic and Plastic Deformations", *Proceedings of International Joint Symposium on Urban Geotechnics for Sustainable Development*, 2-3 November 2012, Seoul, pp. 123-126.
 27. Jung, Y.-H., Byeon, B.-H., Mok, Y.-J. (2012) "Photoelastic quantification of contact force chains in granular mass", *Geotechnique letters* (submitted).
 28. Tordesillas, A. and Muthuswamy, M. (2009) "On the modeling of confined buckling of force chains", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 57, pp. 706-727.

29. Hunt, G.W., Tordesilla, A., Green, S.C. and Shi, J. (2010) “Force-chain buckling in granular media: a structural mechanics perspective”, *Philosophical transactions of the royal society A*, Vol. 368, pp. 249–262.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.