

# DIP 기법을 이용한 조립토의 전단영역 크기 분석

## The Thickness of Shear Zone in Granular Materials Using Digital Image Processing

민 덕 기<sup>1</sup> Min, Tuk-Ki

김 치 영<sup>2</sup> Kim, Chi-Young

### Abstract

This study investigated the effect of relative density on the thickness of shear zone. Digital image processing was used to measure the thickness of shear zone under plane strain conditions. A suitable epoxy resin was injected into the sample and the thickness of the shear zone was investigated. Four independent condition samples were prepared and the thickness of the shear zone was measured. The results indicated that the thickness of shear zone increases as the initial density of sample increases, and during the shear, the void ratios of the shear zone were changed, but the thickness of shear zone was not changed. In addition, the result of measurement of the thickness showed that the thickness of shear zone was almost fixed before critical state, but beyond critical state, the thickness of shear zone sharply increases as relative density increases.

### 요 지

본 논문은 DIP(digital image processing)기법을 이용하여 조립토의 직접전단실험시 발생하는 전단영역의 크기에 대해 상대밀도와 전단하중이 미치는 영향에 대해 분석하였다. 전단변형 후 DIP기법을 적용하여 전단영역의 측정을 위해 적절한 고화제(epoxy resin)를 선택하여 4단계의 초기 상대밀도를 가진 시편이 준비되었고, 각각의 시료에 대해 전단시험 및 고화제 주입, 시편제작, 이미지 분석 등의 단계를 거쳐 전단영역의 크기가 측정하였다. 전단영역의 크기 측정 결과, 시료의 초기 상대밀도가 증가할수록 전단영역의 크기도 증가하고, 전단하중 재하 중 전단영역 내부의 간극비는 변하지만 전단영역의 크기는 변하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 시편의 초기 상대밀도가 한계상태 이전에는 상대밀도에 따라 전단영역의 크기가 거의 변하지 않으나 한계상태를 지나 조밀한 상태가 된 경우 상대밀도가 증가함에 따라 전단영역의 크기가 크게 증가하는 것으로 나타났다.

**Keywords :** DIP, Direct shear test, Epoxy resin, Shear zone, Thickness of shear zone

### 1. 서 론

지반과 흙 구조물의 파괴는 점토사면의 법면 부근에서 나타나는 인장균열을 제외하고는 대부분 전단파괴이므로 흙의 전단강도 추정에는 토질역학의 가장 중요한 과제의 하나로 되어 있다. 또한 건물기초, 교량, 댐, 도

로 등과 같은 각종 토목 구조물의 설계 또는 시공 및 안정해석에서 중요한 문제 중의 하나는 지반의 거동을 정확히 예측하는 것으로 특히 조립토에서는 지지력보다는 변형문제가 일반적으로 더 중요하다. 이러한 조립토의 강도정수는 토립자의 강도, 입자의 모양, 입도조성과 밀도, 구조, 함수량의 영향을 받으며, 고체입자간

1 정희원, 울산대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Ulsan, tkmin@ulsan.ac.kr, 교신저자)

2 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 석사수료 (Dongil Engrg. Consultants Co., Ltd.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 2월 28일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

의 마찰과 맞물림에 의한 조립토의 파괴는 특정한 크기와 패턴을 가진 전단영역이라 불리는 영역 내에서 입자의 재배열에 의해 결정된다.

전단영역은 일반적으로 전단면의 각도와 전단면의 모양, 크기로 표현되며, 이러한 전단영역의 거동은 조립토의 구조를 이해하는데 필요한 기초적 이론인 응력-변형을 관계를 통해 설명할 수 있다. 이에 따라 조립토의 전단강도 및 변형에 관한 연구는 입자 사이의 마찰각과 입자사이의 맞물림에 의한 전단저항각 사이의 관계가 중요하게 연구되어 왔다.

전단영역의 모양과 크기에 관한 연구로 Oda(1972, a)는 삼축압축시험을 통하여 모래의 재성형 메커니즘에 관해 연구하였고, Matsuoka(1974)는 광탄성재료의 원형봉을 이용하여 미세학적 관점으로부터 조립토의 전단메커니즘을 연구하였다. Muhlhaus와 Vardoulakis(1987)는 조립토의 전단영역 크기에 관한 연구를 실시하여 조립토의 전단영역은 조립토의 중앙 입경에 비례한다는 실험 결과를 제시하였다. 또한, Oda 등(1998)은 이방성을 유발시키는 인자에 대한 연구를 통해 전단영역 내에서 발생하는 큰 공극은 수직 기둥들의 휨 현상으로 표현할 수 있다고 하였다. 그 밖의 전단 영역의 크기에 대한 연구들로, Scarpelli와 Wood(1982), Muhlhaus와 Vardoulakis(1987)는 전단영역의 크기를 중앙입경의 8~10배, Bardet와 Proubet(1991)는 15~18배의 범위로 제시하고 있으며, Yoshida 등(1994)은 전단영역의 범위를 중앙입경의 7~20배 범위로 제시하며 전단영역의 거동은 입자의 모양과 평균압력에 관계있다고 하였다.

Alshibli와 Strure(1999)는 모래의 전단영역 크기를 직접 측정하는 방법과 에폭시를 이용하여 고화된 시편에 대하여 디지털 이미지 기법을 사용하여 전단영역의 크기를 측정하는 방법을 비교한 결과 두 방법에 의해 거의 동일한 전단영역의 크기를 살펴볼 수 있었고 입자의 크기가 커질수록 시료 초기 밀도가 감소할수록 전단영역의 크기가 감소한다고 하였다. Frost와 Kuo(1996a, 1996b)는 디지털 이미지 분석을 사용하여 레진 주입방법에 따라 고화된 시료의 준비방법을 제안하였으며, 시료를 교란시키지 않고 정량적인 조립토의 분석이 가능하다고 설명하였다.

본 논문에서는 조립토의 전단거동에서 변형의 문제 즉, 다일레이턴시(dilatancy)특성이 조립토의 강도정수에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나인 밀도의 영향을 정량적으로 분석하기 위해 최근 여러 분야에 걸쳐 활발하게

연구가 이루어지고 있는 DIP(digital image processing) 기법을 적용하여 조립토의 전단응력 단계별 전단변형 특성과 시료의 초기 상대밀도에 따른 전단변형 특성을 분석하였다.

## 2. 분석시료의 특성

본 연구에서는 주문진 표준사를 이용하여 직접전단 실험을 통해 전단 변형시 전단영역의 변화에 대한 관찰을 실시하였다. 이를 위하여 각 하중 단계별로 에폭시 레진(resin)을 이용하여 시료를 고화시키고, 고화된 시편을 절단 및 그라인딩작업을 통해 분석에 적합한 시편을 획득하고 DIP기법을 적용하여 전단영역 특성을 정량적으로 분석하였다.

표 1에는 본 연구에서 사용한 주문진 표준사의 물성을 나타내고 있다. 사용된 표준사는 비중 2.63,  $D_{60}=0.6\text{mm}$ ,  $D_{30}=0.5\text{mm}$ ,  $D_{10}=0.4\text{mm}$ 로써 균등계수 1.50, 곡률계수 1.04인 시료로써 통일분류법으로는 SP로 분류된다. 그림 1은 사용시료의 입도분포를 보여주고 있다. 전단실험은 건조시료에 대하여 실시하였으며, 전단실험 시 초기 상대밀도를 조절하기 위해 태핑법(tapping), 다짐법(plunging) 그리고 공중낙하법(air-pluviation method)을 사용하여 초기 상대밀도 76%, 52%, 40%, 12%의 4가지 시료를 제작하였다.

표 1. 표준사의 물리적 성질

Sample	W(%)	LL(%)	IP	Gs	Cu	Cc	USCS
	0.04	-	NP	2.63	1.50	1.04	SP
주문진 표준사	최대건조단위중량			최소건조단위중량			
	$\gamma_{dmax} (g/cm^3)$			$\gamma_{dmin} (g/cm^3)$			
	1.69			1.53			

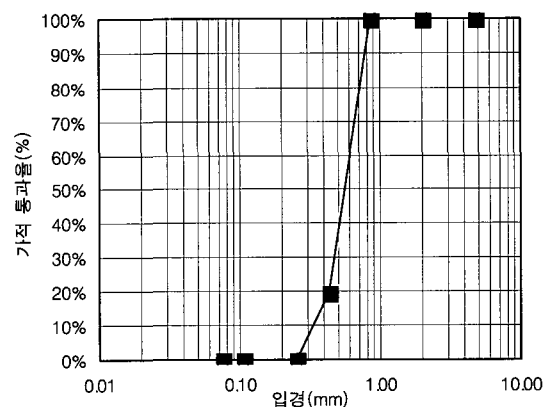


그림 1. 표준사의 입도분포곡선

### 3. 시편 준비

직접전단 시험을 통해 발생하는 조립토의 전단영역의 크기를 측정하기 위해 전단변형 후 시료의 상태를 고정할 수 있는 적절한 고화제를 사용하여 고결시킨 후, 적당한 크기로 시편을 절단하고 DIP기법을 적용하여 측정하기 위해 절단과 폴리싱 과정을 통한 시편 제작 방법 등 전반적인 시료 준비방법을 제안하였다.

#### 3.1 에폭시 레진 선택

흙 시료 구조를 고정시키기 위해서는 레진을 시료에 주입한 후 고화시키거나, 시료를 물로 포화시켜 얼리는 동결방법 등이 있다. 하지만 동결방법은 녹기 쉽고, 자르기, 그라인딩, 폴리싱 등의 과정에서 정확하고 많은 양의 시료를 얻을 수 없기 때문에, 두 방법 중 레진주입 방법이 좀더 실용적이다. 조립토를 고화시키기 위해 에폭시 레진을 사용할 경우 필수적인 요건은 주입하고 양생하는 동안 레진이 시료를 교란시키지 않아야 한다. 많은 에폭시 레진이 이러한 특징을 가질 수 있다. 본 논문에서는 표 2와 같이 양생 시 절단, 글라인딩, 폴리싱 등 일련의 과정을 수행하기에 충분한 정도의 접착강도와 중간정도의 굳기를 나타내며, 대부분의 플라스틱과 반응하지 않고, 독성이 없는 특성을 가진 YD-115CA를 본 실험에 사용된 조립토의 고화에 적합한 레진으로 판단하였다.

또한, YD-115CA 에폭시 레진은 소요의 점도를 가지기 위해서 용매로 아세톤을 혼합하였으며, 소요의 강도를 위해 경화제를 혼합하였다. 아세톤 및 경화제에 대한 다양한 혼합비에 대한 실험 결과로부터 부피 비 100(레진) : 60(경화제) : 10(아세톤)의 비율을 최적 혼합비로 결정하였다.

#### 3.2 주입장치 제작

본 연구에서는 조립토에 대한 직접전단실험을 실시하기 위하여 그림 2와 같은 15mm 두께의 아크릴 막대

표 2. 에폭시 레진의 특성

종류	양생시간	점도	수축율/ 팽창율	보관온도	혼합제
YD-115CA	48시간	150cps	1%이하 / 1%이하	상온보관	아세톤 + 경화제

를 이용하여 직접전단실험기를 제작하였다. 본 실험에 사용한 전단상자는 기존에 일반적으로 사용하여 오던 직접전단시험기의 전단상자와 같은 크기와 모양을 가지고 있다. 아크릴을 이용하여 제작이 되어 있기 때문에 에폭시 주입 후 고결된 시편을 제거할 때 발생할 수 있는 일부 손상에도 그 부분을 저렴한 가격으로 쉽게 대처할 수 있는 장점이 있다.

#### 3.3 절단 및 폴리싱

직접전단 시험을 통해 고화된 시료로부터 잘라낸 시편의 이미지를 획득하고 분석함으로써 이미지 분석을 수행하였다. 정확한 분석을 위해 시료로부터 잘려진 시편은 그라인딩 작업과 폴리싱 작업을 거쳐야 한다. 그림 3에서와 같이 60mm × 60mm × 60mm의 직접전단 시료에 대해 전단영역의 관찰을 위해 중앙부분의 수직시편을 크기 5mm 두께로 절단하였다.

DIP기법에 의한 정량적인 이미지 분석의 정확성은 획득된 이미지의 품질에 좌우되며, 이미지의 품질은 잘라낸 시편의 표면위에서 에폭시 레진의 경계면과 모래입자간의 대비가 필요하다. 낮은 정도의 대비 이미지는 4장에서 설명될 이미지처리과정에서 향상될 수 있지만,

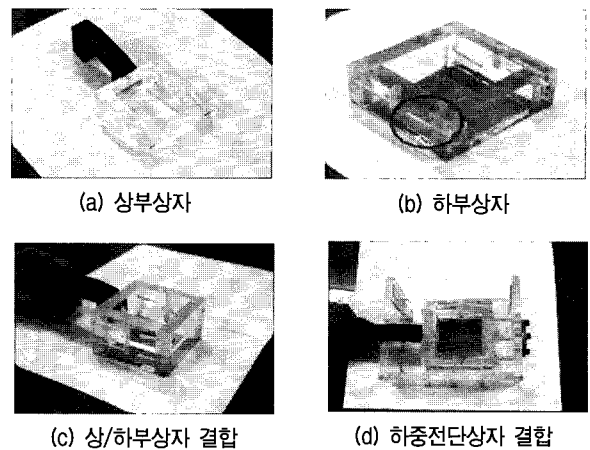


그림 2. 전단상자

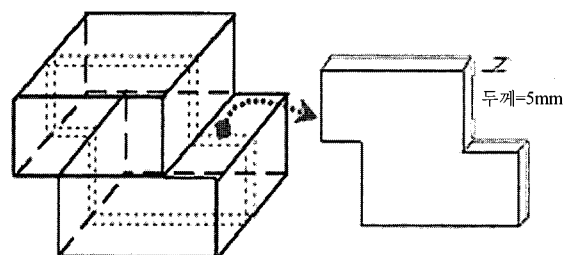


그림 3. 고화된 시료로부터 시편 절단

가능한 처리과정을 최소로 하기 위해 양질의 이미지를 획득하는 것이 중요하다. 본 연구에서 시편 표면위에 있는 2개의 구성성분은 물리적 화학적 성질이 다른 모래 입자와 에폭시 레진이다. 모래 입자는 주로 에폭시 레진보다 단단한 silica로 구성되어 있으나, 화학적 반응에 대한 내구성은 작은 편이다. 시편 표면의 이 두 구성성분의 경도 차이를 이용하여 모래와 에폭시의 대비가 잘된 이미지를 만들 수 있다. 시료로부터 얇게 절단된 그림 3의 시편을 그라인딩 및 폴리싱 작업을 통해 분리한다. 미세구조 분석을 위한 표면의 준비는 대체로 주관적이고 경험적이며 재료의 적용성에 따라 그 방법과 기법이 다양하지만, 전형적으로 절단작업, 1차연마, 2차연마의 3단계로 구성된다. 또한, 표면과 표면하부의 손상을 최소화하고 고품질의 이미지를 효과적으로 얻기 위해서는 각 단계별로 이미지 품질에 영향을 미치는 여러 요인들에 대한 경험 및 기법이 필요하다. Sid-Ahmed (1995)에 의해 제안된 수정 BUEHLER DIALOG 방법은 이러한 요인들을 정리하여 시편의 준비, 절단 및 폴리싱의 구체적인 내용들을 제시하고 있다. 본 연구에서는 이를 기초로 하여 주문진 표준사의 상태와 여러 상황에 적합한 조건을 적용하여 고품질의 시편을 획득할 수 있었다.

### 3.3.1 절단작업(cutting)

절단작업은 연구자가 관심을 가지는 표면 또는 그 근처에서 작업하기 편리한 크기의 시료를 얻기 위해서 수행한다. 본 논문에서는 암석 박편 절단기를 사용하여 절단작업을 수행하였다. 절단작업을 통해 그림 4과 같은 이미지를 얻었다. 이 이미지는 자른 표면 근처가 균열이 발생하였거나, 입자 내에 균열이 발생되어 있다.

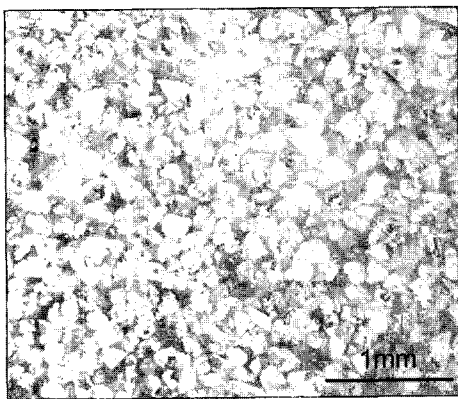


그림 4. 절단작업 후 이미지

### 3.3.2 1차 연마(grinding)

절단작업을 통해 얻어진 시편은 그림 4에서처럼 입자 외부와 내부에 균열이 발생하여 또렷한 이미지의 획득이 어렵다. 이에 따라 절삭작업 후 다이아몬드 디스크가 설치된 연마기를 이용하여 1차 연마작업을 수행하였다. 1차 연마 작업을 수행한 이미지는 그림 5에서와 같이 입자 내/외의 균열이 어느 정도 제거되었으나, 여전히 확실히 레진부분과 입자의 부분의 경계가 또렷하지 못한 상태이다.

### 3.3.3 2차연마(polishing)

2차 연마작업 즉, 폴리싱 작업은 고품질의 시편을 얻기 위한 마지막 단계로 실리콘 카바이드 파우더(silicon carbide powder)를 사용하여 연마하였다. 본 연구에서는 #800, #1500 파우더를 사용하여 두 단계 폴리싱 작업을 20분~30분동안 수행하였다. 폴리싱 작업의 목적은 이미 1차 연마에 의해 다듬어진 시편을 보다 섬세한 작업을 통해 레진부분과 시료의 입자부분을 분리시키기 위함이다. 매우 미세한 파우더에 의해 이루어지는 작업으로 연마 후 이미지의 예는 그림 6과 같다. 2차 연마작업

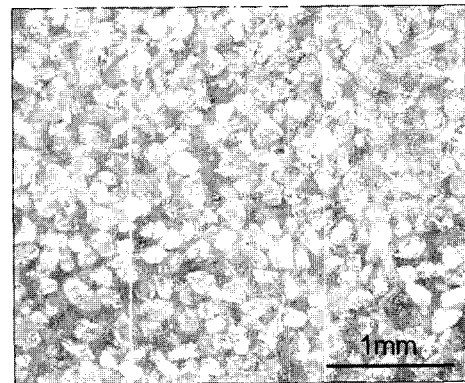


그림 5. 1차 연마작업 후

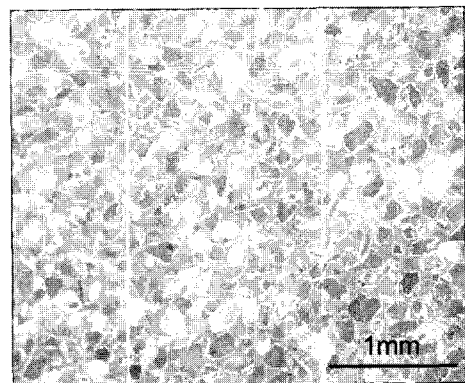


그림 6. 2차 연마작업 후 이미지

을 통해 두 부분의 경도 차이에 의해 모래입자의 부분은 깨끗하게 광택이 나게 되어 입자와 레진 즉 배경이 뚜렷하게 분리된 고품질의 이미지를 획득할 수 있다.

#### 4. 이미지 분석

압축용 주문진 표준사를 이용하여 동일한 입경 하에서 초기 상대밀도를 각각 다르게 제작한 시험체를 이용하여 그림 7에서 보는 바와 같은 이미지획득 장치를 사용하여 분석 이미지를 획득한 후, 이미지 분석 소프트웨어인 image-pro®plus ver. 4.5.1(2002)를 이용하여 각 시험체에 대하여 이미지 분석을 하였다. 본 연구에서 수행된 각 시험체에 대한 이미지 분석과정은 이미지 획득, 그레이 스케일 모드로 이미지 변환, 이진영상처리, 이미지 데이터의 잡음제거의 4단계로 이루어졌으며, 조립토가 전단변형될 시 발생하는 전단영역의 분석을 위해 제작된 시편의 입자의 넓이와 공극의 넓이를 이용하여 4.5 절에서 설명될 국부간극비(local void ratio)를 측정하여 전단영역의 크기를 분석하였다.

##### 4.1 이미지 획득

그림 7에 보는 바와 같은 본 연구에 사용된 광학현미경은 초 광시야 접안렌즈의 채용으로 대상체에 대하여 넓은 범위의 관찰이 용이하고, 해상력이 탁월한 평행 광로형 광학계로 10, 20, 40배의 기본광학 배율을 갖고 있으며, 그림자가 없고 열의 발생이 극히 적은 원형 형광 램프와 이미지를 촬영할 수 있도록 디지털카메라(digital camera)를 장착하고 있다. 본 연구에 사용된 디지털카메라는 OLYMPUS C-5050으로 광학줌 3배, 디지털 줌 2.5배의 배율을 갖고, 해상도는 5,000,000 픽셀이다.

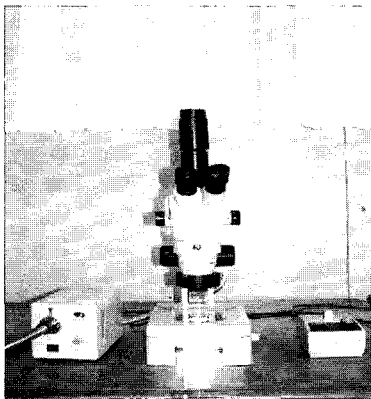


그림 7. 이미지 획득 장치

그림 8은 이미지 입력장치인 광학현미경에 의해 획득된 대상토의 원화상이다. 이 원화상은 이미지상의 각 픽셀이 흑색과 백색은 물론 그 이외의 다른 모든 색상을 가질 뿐 아니라 픽셀의 크기에 의해 색상의 가지 수가 좌우되는 컬러(true color) 이미지이다. 주문진 표준사의 각 상대밀도에 따라 제작된 시편에 대하여 20배의 배율로 절단 및 폴리싱된 전체면의 이미지를 획득하였다.

##### 4.2 이미지 변환

이미지 입력장치에 의해 획득된 대상체의 원화상은 그림 8과 같이 컬러(true color) 색상 이미지이다. 이미지가 가지고 있는 컬러의 일반적인 표현은 적색, 녹색, 청색(RGB)인 컬러 값들로 각 이미지 픽셀의 포착에 의해서 얻어진다. 다른 모든 컬러들은 이 세 가지의 주요 컬러들의 조합으로부터 만들어질 수 있다. 컬러 이미지가 세 개의 독립적인 그레이 스케일(gray scale) 이미지들의 조합으로서 생각될 수 있기 때문에 컬러 이미지 분석의 대부분의 방법들은 그레이 스케일 이미지들에 적용되는 방법들과 크기 다르지 않다. 따라서 그림 9와 같이 데이터의 축소와

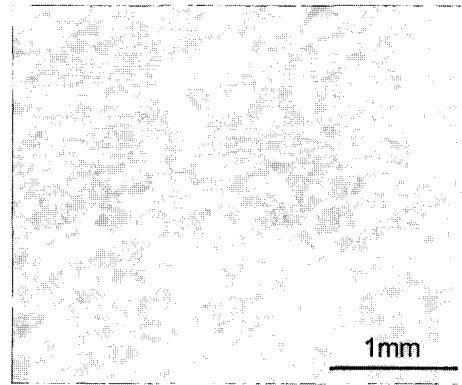


그림 8. 이미지 획득

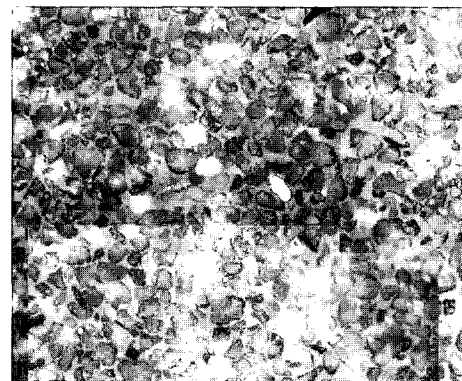


그림 9. gray scale 모드로 변환된 이미지

컬러 필터링에 의해서 발생하는 이미지의 잡음을 제거하기 위해 그레이 스케일 모드로 이미지를 변환하였다.

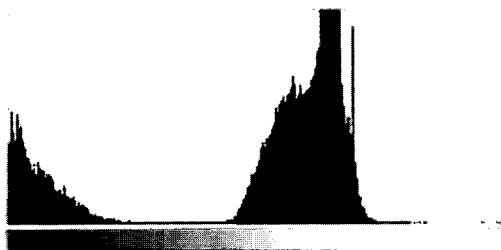
### 4.3 이진영상 처리

이진영상처리란 대상체의 입자를 검정색으로, 배경을 흰색으로 만드는 것을 말한다. 이진영상처리를 위해서는 임계값(threshold)을 먼저 정해야 되는데 이때 사용하는 것이 그림 10과 같이 이미지 데이터가 0~255 단계의 명암도 중 어떤 값의 범위를 가지고 있는지를 나타내는 그레이 스케일 히스토그램이다. 히스토그램을 구한 후 여기서 입자와 배경을 나눌 수 있는 가장 적절한 값을 기준으로 선택한 후 이미지를 기준 이상이면 흰색, 이하이면 검정색으로 처리한다.

본 연구에서는 그림 9와 같이 그레이 스케일 모드로 이미지를 변환 후, 그림 11과 같이 변환된 이미지가 흑·백 두 가지 색상만이 존재하도록 이진영상처리를 하였다.

### 4.4 이미지 잡음제어

이미지 입력장치로 획득된 이미지 데이터의 경우 낮은 해상도, 뚜렷하기 않은 초점, 그리고 부적절한 조명 등으로 인하여 실제로 대상체에 존재하지 않았던 잡음



Mean : 121.71 Median : 146 Pixels : 58782

그림 10. gray scale histogram

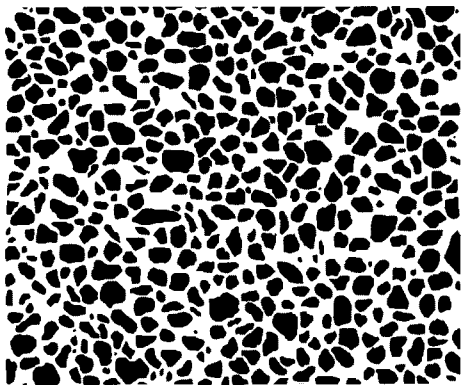


그림 11. 이진영상 처리된 이미지

이 생성되어 이미지의 해상도를 저하시키는 경우가 있다. 이와 같이 잡음을 제거하거나 이미지에서 특정한 형상을 강조하기 위해 사용하는 기법이 필터링(filtering)이다. 필터링방법은 기본적으로 이미지의 일부 또는 전체에 분포하는 픽셀의 밝기를 변화시켜 줌으로써 이미지 데이터 내에 포함되어 있는 정보를 선택적으로 강조하거나 삭제하는 반복 과정을 통해 이루어진다.

이미지 필터링방법에는 이미지 내 픽셀의 밝기 단계의 범위를 줄여줌으로써 이미지의 상세한 부분을 부드럽게 하고, 이미지 내에 불규칙적으로 분포해 있는 잡음을 제거하는 역할을 하는 low pass filter, 이미지의 히스토그램에서 아주 낮은 빈도의 밝기 값을 갖는 픽셀들을 제거함으로써 이미지의 상세한 부분을 강조하여 시각적 해상도를 강화시키는 high pass filter, 그리고 이미지에서 밝기 값에 큰 변화를 나타내는 대상체의 경계 부위를 강조하여 이를 쉽게 검출할 수 있도록 하는 edge filter가 있다. 본 연구에서는 low pass filter를 적용하여 대상체의 이미지 데이터에서 잡음을 제거하고 그림 12과 같은 이미지를 획득하였다.

## 5. 국부 간극비 산정

4장에서 논의된 방법에 의해 측정되는 이미지의 정보는 DIP기법에 의해 측정된 2차원적인 면적에 의한 향으로 일반적으로 사용되고 있는 간극과 입자의 부피 비인 간극비와는 정의에서 차이가 있다.

Bhatia and Soliman(1991)은 Oda(1972b)의 국부 간극비의 개념을 사용하여 이미지에 의해 측정된 입자와 간극의 넓이 비로 표현되는 간극비가 부피의 개념으로 정의되는 간극비와 동일함을 이론적으로 설명하였다. 본 연구에서는 이미지 분석을 통하여 얻은 입자의 면적과

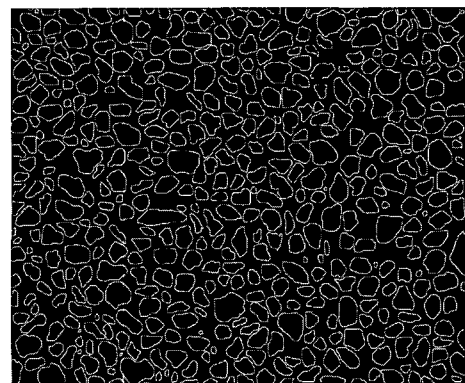


그림 12. 잡음이 제거된 이미지

간극의 넓이의 비로부터 간극비를 평가하였다.

본 연구에서는 이미지 획득 장치에 의해 얻어진 각 상태별 시편의 이미지를 수 개의 섹션을 나누어 분석을 실시하였다. 섹션의 크기는 전단영역의 간극비 분석 시 전단영역의 경계를 명확하게 나타낼 수 있는 크기로 선정되어야 하며 입경의 크기에 따라 영향을 받는다.

본 연구에서 사용한 중앙입경,  $D_{50}=0.58\text{mm}$ 인 주분진 표준사의 경우 섹션 폭에 따른 영향을 분석한 결과 섹션의 폭을 3mm 이상으로 할 경우 전단영역의 경계를 명확하게 측정할 수가 있었다. 따라서 본 연구에서는 분석 시 이미지를 3mm 두께의 섹션으로 나누어 실시하였다.

## 6. 전단 영역 크기 분석

본 연구에서는 전단하중 단계별 전단영역의 변화를 분석하기 위해 그림 13에 나타난 5단계에서 전단영역의 크기에 대해 분석을 실시하였다. 이 그림은 상대밀도 76%의 비교적 조밀한 경우에 대한 전단실험의 결과로 그림에서 ①은 초기 상태를, ③은 침투 강도 상태, 그리고 ⑤는 잔류 강도 상태를 나타낸다.

### 6.1 전단 시 거동

전단 시 하중 단계별 간극비의 변화를 조사하기 위하여 그림 13의 5단계에 대하여 시편 깊이별 간극비를 조사하였다. 그림 14는 상대밀도 76%의 경우 전단 하중 단계별

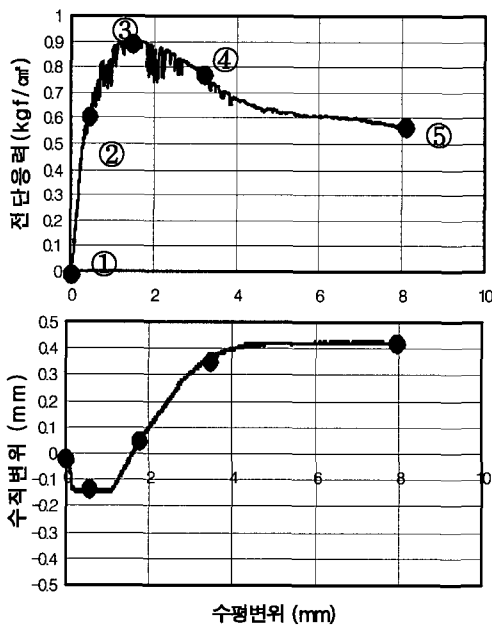


그림 13. 시료 채취 위치

간극비의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 초기상태인 ①의 경우는 시료 전 깊이에 대해 거의 일정한 값을 보이고 있어 시료 전 영역이 같은 간극비의 상태임을 알 수 있다. ②의 상태에서는 전단면을 중심으로 일정 범위인 전단영역 내에서 간극비가 감소하고 있고 전단영역 이외의 부분에서는 간극비의 차이가 발생하지 않았다. 따라서 전체적으로는 체적이 감소한다. 침투 강도 상태인 ③에서는 전단영역의 간극비가 다시 증가하여 체적이 증가하는 현상을 볼 수 있으며, 그 이후 ④와 잔류 강도 하중 상태인 ⑤에서는 계속 간극비가 증가하는 현상을 볼 수 있다. 전단실험 중 전단하중단계에 따라 간극비는 감소하였다가 증가하고 있음을 알 수 있으며 이러한 경향은 그림 13의 수직 변위 곡선의 결과와 일치하고 있다. 또한 그림 14로부터 간극비가 변화하는 영역 즉 전단영역의 크기는 전단 하중 단계에는 크게 영향을 받지 않고 일정한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

본 시료의 한계간극비에 해당하는 상대밀도 40%인

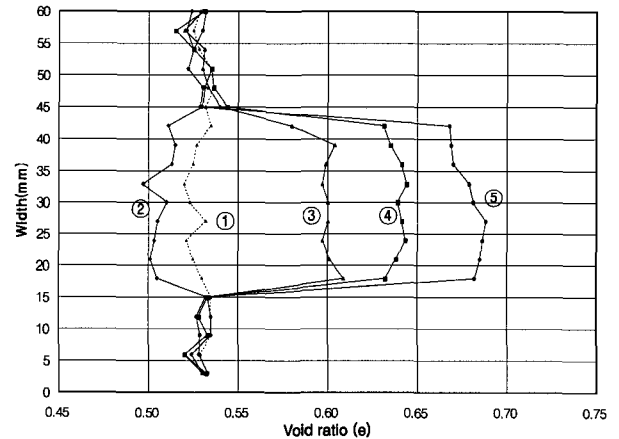


그림 14. 하중단계별 간극비의 변화( $D_r = 76\%$ )

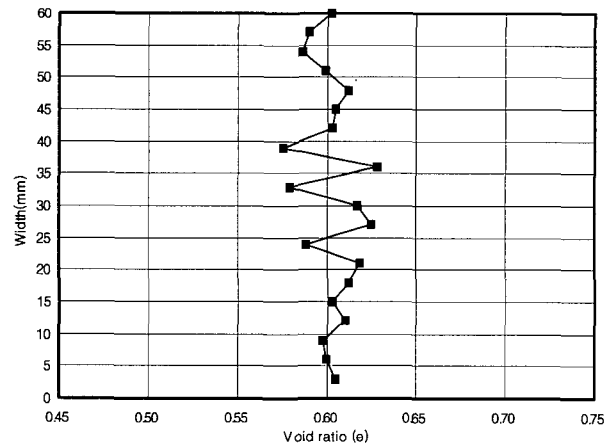


그림 15. 상대밀도 40%시 극한 하중 상태에서의 간극비의 변화

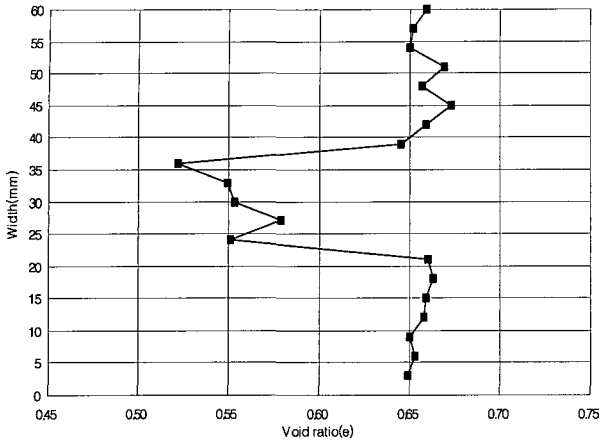


그림 16. 상대밀도 12%시 극한 하중 상태에서의 간극비의 변화

시료의 경우의 잔류 강도 상태에서의 간극비를 그림 15에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전단 영역 내에서의 간극비는 다소 변동을 보이고 있으나 평균 간극비는 초기간극비에 해당하는 전단 영역 밖의 간극비와 일치하고 있다. 따라서 전체 체적의 크기에는 변화가 없는 것으로 나타났다.

그림 16에는 느슨한 경우인 상대밀도 12%에 대한 잔류 강도 상태에서의 간극비 분석 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 잔류 강도 상태에서 전단영역의 간극비가 초기상태의 간극비보다 감소하여 압축이 발생된 것을 보여준다.

## 6.2 전단영역 크기 분석 결과

초기 간극비에 따른 전단영역의 크기에 대한 영향을 알아보기 위하여 그림 17에는 초기 상대밀도에 따른 잔류강도상태에서의 전단영역의 크기를 나타내었다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 느슨한 상태인 상대밀도 12% 곡선에서는 전단영역에서 간극비가 감소하는 압축현상이 발생하였으며 전단 영역의 크기는 상대적으로 작게 나온 것을 알 수 있다. 이에 비하여 한계간극비 상태인 상대밀도 40%의 경우 간극비의 크기는 깊이에 따라 확연한 증가나 감소 현상을 보이지는 않아 전체 체적에는 변화가 없는 것으로 나타났으나 전단영역이라 판단되는 부분의 폭이 느슨한 경우보다는 크게 나타났다. 반면 한계간극비보다 조밀한 상대밀도 62% 및 76%의 경우 간극비의 증가로 부피가 팽창하는 현상을 볼 수 있으며 전단영역의 크기 역시 점차 증가한 것으로 나타났다.

그림 18은 상대밀도에 따른 전단영역의 크기를 중앙

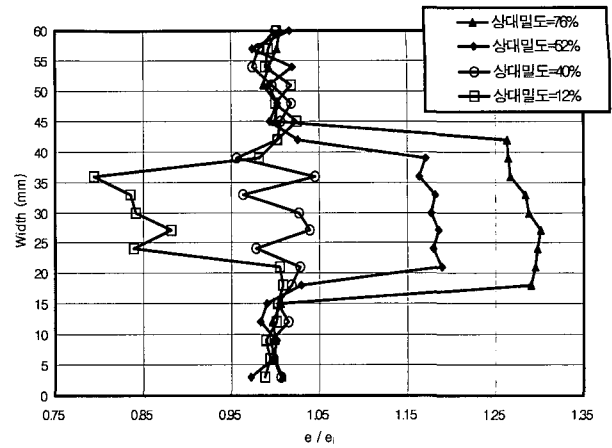


그림 17. 상대밀도에 따른 간극비의 변화

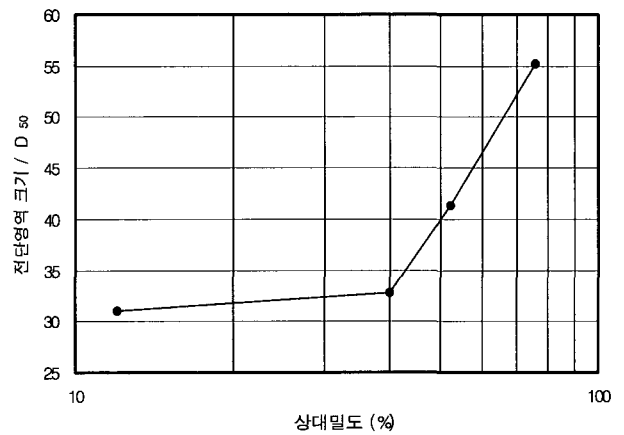


그림 18. 상대밀도에 따른 전단영역크기

입경,  $D_{50}$ 의 크기에 대한 비로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 상대밀도가 증가할수록 전단영역의 크기도 증가하고 있으나, 시료의 상태가 한계상태에 다다르기 전인 느슨한 상태에서 조립토의 전단영역의 크기는 상대밀도에 크게 영향을 받지 않고 있으며, 한계간극상태 이후, 즉 시료의 상태가 조밀한 경우에는 상대밀도의 증가에 따라 전단영역은 크게 증가하는 것으로 나타났다.

## 7. 결론

조립토의 전단거동에 영향을 미치는 여러 요인들 중 초기상대밀도와 전단하중 재하단계에 따른 영향을 분석하기 위해 DIP기법을 적용하여 측정된 조립토의 전단 거동 중 발생하는 전단영역의 크기를 이용하여 각각의 초기상대밀도와 전단하중 재하단계가 조립토의 전단거동에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.



- (1) 국부 간극비를 이용한 전단영역 분석은 직접전단시험과 같은 평면변형률상태에 있는 시편 내부의 거동을 나타낼 수 있는 좋은 지표가 될 수 있는 것으로 판단된다. 분석 결과 시편의 간극비의 분포상태를 통해 시료의 상대밀도와 전단영역의 크기의 관계를 파악할 수 있었고, 조립토의 dilatancy 현상은 전단영역내의 간극비의 변화로 인해 발생하는 것으로 나타났다.
- (2) 전단응력의 재하 단계별 상태를 분석한 결과, 각 하중 단계별 간극비의 변화를 파악할 수 있었으며, 전단 응력 재하 단계에 따른 전단영역의 크기에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.
- (3) 전단영역의 크기는 시료의 상태가 한계상태보다 느슨한 경우에는 상대밀도에 크게 영향을 받지 않으나, 조밀한 경우에는 초기 상대밀도의 크기가 증가함에 따라 전단영역의 크기도 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해 조립토의 초기 상대밀도는 시료의 전단강도 및 전단 특성에 영향을 주는 지표가 될 수 있는 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2006년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 사의를 표합니다.

### 참 고 문 헌

1. Alshibli, K. A. and Strure, S. (1999), "Sand shear zone thickness measurements by digital imaging techniques", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.13, No.2, pp.103-109.
2. Bardet, J. P. and Proubet, J. (1991), "A numerical investigation of the structure of persistent shear zones in granular media.", *Geotechnique*, Vol.41, No.4, pp.599-613.
3. Bhatia, S. K. and Soliman, A. F. (1990), "Frequency distribution of void ratio of granular material determined by an image analyzer", *Soils and Foundations*, Vol.30, No.1, pp.1-16
4. Frost, J. D. and Kuo, C. Y. (1996, a), "Automated determination of the distribution of local void ratio from digital images", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.19, No.2, pp.107-117.
5. Frost, J. D. and Kuo, C. Y. (1996, b), "Uniformity evaluation of cohesionless specimens using digital image analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.122, No.5, pp. 390-396.
6. Matsuoka, H. (1974), "A microscopic study on shear mechanism of granular materials", *Soils and Foundations*, Vol.14, No.1, pp.29-43.
7. Muhlhaus, H. B. and Vardoulakis, I. (1987), "The thickness of shear zones in granular materials", *Geotechnique*, Vol.37, No.3, pp.271-283.
8. Oda, M. (1972, a), "Deformation mechanism of sand in triaxial compression tests", *Soils and Foundations*, Vol.12, No.4, pp.45-63.
9. Oda, M. (1972, b), "Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material", *Soils and Foundations*, Vol.12, No.1, pp.17-36.
10. Oda, M, Kazama, H. and Konishi, J. (1998), "Effects of induced anisotropy on the development of shear zones in granular materials", *Mechanics of Materials*, Elsevier, Vol.28, pp.103-111.
11. Scarpelli, G. and Wood, D. M. (1982), "Experimental observations of shear zone patterns in direct shear tests", *Proc. IUTAM Conf. Deformation and Failure of Granular Materials*, pp.473-484.
12. Sid-Ahmed, M. A. (1995), *Image Processing Theory, Algorithms and Architectures*, McGraw Hill, New York, 611 pp.
13. Yoshida, T., Taysuoka, F., Siddiquee, M. S. A. and Kamegai, Y. (1994), "Shear banding in sands observed in plane strain compression", *Proc. 3rd Int. Workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks*, (eds Chambon, R., Desrues, J. and Vardonlakis, I.) Rotterdam, Balkema, pp.165-180.
14. Image-Pro® Plus Version 4.5.1. (2002), *User's Manual*, Media Cybernetics, Inc.

(접수일자 2006. 4. 17, 심사완료일 2006. 6. 28)