



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

3차원 블록 분할 알고리즘을  
이용한 파쇄도 분석 기법 개발

**Fragmentation Analysis  
using 3D Block Delineation Algorithm**

2014년 8월

서울대학교 대학원  
에너지시스템공학부  
한 정 훈

# 3차원 블록 분할 알고리즘을 이용한 파쇄도 분석 기법 개발

## Fragmentation Analysis using 3D Block Delineation Algorithm

지도교수 송 재 준

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함  
2014년 5월

서울대학교 대학원  
에너지시스템공학부  
한 정 훈

한정훈의 공학박사 학위논문을 인준함  
2014년 6월

위 원 장 \_\_\_\_\_

부위원장 \_\_\_\_\_

위 원 \_\_\_\_\_

위 원 \_\_\_\_\_

위 원 \_\_\_\_\_

## 초 록

발파에서 파쇄암의 입도 분석은 발파 설계의 효율성과 발파 생산성을 평가하기 위한 기초 수단이다. 토질공학 분야에서는 체거름 시험을 통하여 토사의 입도를 분석하고 있으나, 암반공학 분야에서는 암석의 크기로 인해 일반적으로 컴퓨터 소프트웨어를 이용한 수치적인 분석이 주를 이루고 있다. Split Desktop, WipFrag, FragScan 등은 이러한 암석의 입도 분포 분석에 이용되는 대표적 소프트웨어로, 2차원 영상처리기법에 기초한 파쇄도 분석 전문 프로그램이다. 그러나 2차원 영상처리기법에서는 영상 내 대상의 경계 및 면적 정보 등 2차원 정보만을 이용하므로, 3차원 좌표 정보를 활용하지 못하는 한계가 있다. 또한 2차원 기법을 이용한 파쇄도 분석에 관한 연구는 컨베이어 벨트나 버킷 등의 위에 평면적으로 배치된 파쇄암들에 대한 해석이 주를 이루고 있다. 그러나 실제 발파 현장에서 파쇄암은 더미 형태로 존재하게 되므로, 발파 직후 이러한 암석 더미의 파쇄도를 분석할 수 있다면 발파 생산성을 높이는 데 큰 도움을 줄 수 있다.

입체사진측량은 스테레오 영상을 취득한 후 대상의 3차원 공간 정보를 추출하는 기법이다. 이 기법을 통해 여러 방향에서 얻은 영상을 이용하여 대상의 3차원 형상 정보를 복원할 수 있으며, 2차원 영상처리기법과 비교하여 보다 많은 정보를 정확히 추출할 수 있다. 이 연구에서는 이러한 입체사진측량기법을 적용하여 암석의 크기를 3차원적으로 분석하였다. 우선, 입체사진측량기법을 이용하여 평면배치 파쇄암에 대하여 입도 분포를 분석하고 그 결과를 수조를 이용한 측정 및 2차원 영상처리기법의 결과와 비교함으로써 그 적용성을 평가하였다. 또한 더미배치에서는 더미 전체의 정보를 확인할 수 없으므로 더미 외측 블록들의 크기를 이

용하여 전체 더미 암석의 파쇄도를 추정하였으며, 현장 파쇄 더미에 대한 분석을 통해 더미 외측 블록 정보를 이용한 통계 추정 기술의 적용성을 평가하였다.

마지막으로 블록 분할 알고리즘을 개발하였다. 우선 입체사진측량기법을 이용하여 파쇄 더미에 대한 3차원 점군(point cloud) 자료를 얻었다. 이후 암석 자료의 형상 특성을 고려하여 공통점이라고 생각되는 요소들을 파악한 후 이를 기초로 블록을 구분하는 알고리즘을 개발하였으며, 이 알고리즘과 상기 통계적 추정 기술을 통합하여 파쇄 더미의 입도 분포 분석 과정을 자동화하는 기술을 개발하였다.

**주요어 : 2차원 영상처리기법, 파쇄도 분석, 입체사진측량기법, 통계 추정, 블록 분할 알고리즘**

**학 번 : 2007-30856**

# 목 차

초록 .....	i
List of Figures .....	vi
List of Tables .....	x
<b>1. 서론 .....</b>	<b>1</b>
1.1 연구 배경 및 동향 .....	1
1.2 연구 범위 및 내용 .....	6
<b>2. 기초 이론 .....</b>	<b>8</b>
2.1 파쇄도 분석 방법 .....	8
2.2 입체 영상 정합을 이용한 3차원 정보 복원 이론 .....	10
2.2.1 공액 기하 .....	10
2.2.2 영상 정합 기법 .....	17
2.2.3 블록 매칭 .....	18
2.2.4 시차 지도를 이용한 3차원 공간 재현 .....	21
2.3 파쇄도 분석을 위한 영상 분할 이론 .....	23
2.4 패턴 인식을 이용한 자료 분류 .....	27
<b>3. 2차원 영상을 이용한 파쇄도 분석 .....</b>	<b>29</b>
3.1 영상 획득 장비 .....	29
3.2 2차원 파쇄도 분석 방법 .....	30

3.3	평면배치에 대한 파쇄도 분석 .....	32
3.4	더미배치에 대한 파쇄도 분석 .....	36
3.5	결과 분석 .....	40
<b>4.</b>	<b>3차원 블록 분할 자동화 기법을 이용한 파쇄도 분석</b>	
	<b>기법 개발 .....</b>	<b>45</b>
4.1	입체사진측량기법을 이용한 3차원 파쇄도 분석 .....	45
4.1.1	3차원 정보 복원 .....	45
4.1.2	평면배치에 대한 3차원 파쇄도 분석 .....	46
4.1.3	통계적 파쇄도 분석 과정 .....	50
4.1.4	입력 자료 개선 .....	52
4.1.5	더미배치에 대한 통계적 파쇄도 분석 .....	56
4.1.6	결과 분석 및 고찰 .....	76
4.2	블록 분할 알고리즘 구성 .....	79
4.2.1	전처리 .....	81
4.2.2	블록 찾기 .....	87
4.2.3	사용자 입력을 통한 블록 찾기 .....	96
4.2.4	블록 정보 분석 .....	101
4.3	개발 기법의 통합 .....	103
<b>5.</b>	<b>개발 기법의 적용성 평가 .....</b>	<b>105</b>
5.1	평면배치에 대한 적용 .....	105
5.2	더미배치에 대한 적용 .....	112
5.3	평가 결과 고찰 .....	123

<b>6. 결론</b> .....	<b>127</b>
<b>참고문헌</b> .....	<b>130</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>139</b>



## List of Figures

Fig. 2.1 General type of photography .....	12
Fig. 2.2 Epipolar geometry .....	12
Fig. 2.3 Scale-induced distortion .....	14
Fig. 2.4 Axial rotation .....	15
Fig. 2.5 Photographing condition for a stereo-image .....	17
Fig. 2.6 Coordinate determination using the ratio of similitude .....	22
Fig. 2.7 First-order derivative operators for an edge detection .....	25
Fig. 2.8 Laplacian filters .....	26
Fig. 2.9 Derivatives of an edge function (McAndrew et al., 2010) ..	26
Fig. 3.1 Flowchart in Split Desktop .....	31
Fig. 3.2 Scattered blocks of different arrangements .....	33
Fig. 3.3 Delineation results using Split Desktop for scattered blocks .....	34
Fig. 3.4 Size distributions using Split Desktop for scattered blocks .....	35
Fig. 3.5 Heaped blocks of different arrangements .....	37
Fig. 3.6 Delineation results using Split Desktop for heaped blocks ..	38
Fig. 3.7 Size distributions using Split Desktop for heaped blocks ....	39
Fig. 3.8 Size distributions from the water tank measurement and the Split Desktop analysis for scattered blocks .....	41
Fig. 3.9 Size distributions from the water tank measurement and the Split Desktop analysis for heaped blocks .....	42

Fig. 4.1 Flowchart in PhotoModeler Scanner .....	46
Fig. 4.2 Modeling images using a PhotoModeler Scanner for scattered blocks .....	47
Fig. 4.3 Size distributions from the water tank measurement and the PhotoModeler Scanner analysis for scattered blocks .....	48
Fig. 4.4 Procedure for the Surface Based Estimation, SBE .....	51
Fig. 4.5 Distorted estimation result using improper input parameters .....	52
Fig. 4.6 Possible source of error of heaped blocks (Han & Song, 2014) .....	55
Fig. 4.7 Modeling images using a PhotoModeler Scanner for heaped blocks .....	57
Fig. 4.8 Frequency count of surface blocks analyzed with a PhotoModeler Scanner for heaped blocks .....	58
Fig. 4.9 Size distributions from the SBE and the water tank measurement without the improvement of input parameters for heaped blocks .....	61
Fig. 4.10 Size distributions from the SBE and the water tank measurement with the improvement of input parameters for heaped blocks .....	62
Fig. 4.11 Muckpile in the field .....	64
Fig. 4.12 Modeling images using a PhotoModeler Scanner for a muckpile in the field .....	65
Fig. 4.13 3D modeling for an individual block .....	67

Fig. 4.14	Frequency count of surface blocks analyzed with a PhotoModeler Scanner for a muckpile in the field .....	68
Fig. 4.15	Size distributions from the SBE and the water tank measurement without the improvement of input parameters for a muckpile in the field .....	71
Fig. 4.16	Size distributions from the SBE and the water tank measurement with the improvement of input parameters for a muckpile in the field .....	73
Fig. 4.17	Basic concept of the proposed algorithm .....	80
Fig. 4.18	Mesh reconstruction .....	83
Fig. 4.19	Peak detection .....	83
Fig. 4.20	Peak detection results according to the size of the area of interest .....	86
Fig. 4.21	Data inside the area of interest .....	89
Fig. 4.22	Data of interest after rotation .....	89
Fig. 4.23	Data before refinement .....	91
Fig. 4.24	Block-shape refinement .....	91
Fig. 4.25	Cutting at the valley .....	93
Fig. 4.26	Block data delineated using the Block Delineation Algorithm .....	94
Fig. 4.27	Cases where the proposed algorithm is not applied .....	97
Fig. 4.28	Method for inner point identification .....	98
Fig. 4.29	Block boundary decision in the manual analysis process ..	99
Fig. 4.30	Case where the block volume is overestimated .....	102

Fig. 4.31 Flowchart of the integrated algorithm .....	104
Fig. 5.1 Description of the Block Delineation Algorithm result .....	107
Fig. 5.2 Example image of the Block Delineation Algorithm results .....	108
Fig. 5.3 Size distributions from the water tank measurement and the BDA for scattered blocks .....	111
Fig. 5.4 Frequency count of surface blocks analyzed with the BDA for heaped blocks .....	114
Fig. 5.5 Size distributions from the integrated algorithm and the water tank measurement for heaped blocks .....	115
Fig. 5.6 Frequency count of surface blocks analyzed with the BDA for a muckpile in the field .....	118
Fig. 5.7 Size distributions from the integrated algorithm and the PhotoModeler Scanner analysis for a muckpile in the field .....	120

## List of Tables

Table 3.1 Camera specification, Nikon D200 .....	29
Table 3.2 Lens specification, Nikon AF-S DX 18-70mm (f/3.5-4.5G IF-ED) .....	30
Table 3.3 Errors between the water tank measurement and the Split Desktop analysis for scattered blocks .....	44
Table 3.4 Errors between the water tank measurement and the Split Desktop analysis for heaped blocks .....	44
Table 4.1 Errors between the water tank measurement and the PhotoModeler Scanner analysis for scattered blocks .....	50
Table 4.2 Errors of surface blocks in heaped blocks (After Han & Song, 2014) .....	55
Table 4.3 Errors between the water tank measurement and the SBE for heaped blocks .....	60
Table 4.4 Errors between the SBE and the water tank measurement: Field 1 .....	75
Table 4.5 Errors between the SBE and the water tank measurement: Field 2 .....	75
Table 4.6 Errors between the SBE and the water tank measurement: Field 3 .....	75
Table 5.1 Errors between the water tank measurement and the BDA for scattered blocks .....	110

Table 5.2 Errors between the integrated algorithm and the water tank measurement for heaped blocks .....	116
Table 5.3 Errors between the integrated algorithm and the PhotoModeler Scanner analysis: Field 1 .....	122
Table 5.4 Errors between the integrated algorithm and the PhotoModeler Scanner analysis: Field 2 .....	122
Table 5.5 Errors between the integrated algorithm and the PhotoModeler Scanner analysis: Field 3 .....	122
Table 5.6 Delineated rate using the Block Delineation Algorithm ...	126

# 1. 서론

## 1.1 연구 배경 및 동향

밭파 현장에서의 암석의 파쇄도 분석은 밭파 효율 및 생산성을 평가하는 가장 기초적인 수단으로 일반적으로 파쇄암들의 입도 분포 분석을 통하여 이루어진다. 이러한 파쇄도 분석 결과는 설계 목표와 비교를 통해 설계 달성도 평가에 이용될 수 있으며, 또한 이를 2차 밭파 설계에 대한 기초 자료로 활용함으로써 최적의 밭파를 유도할 수 있다. 특히 채석 밭파에서 밭파로 인해 거대한 파쇄암이 발생되는 경우, 이는 2차 파쇄 비용 및 적재, 운송 시스템 설계에 매우 중요한 요소가 되므로, 정확한 파쇄암의 크기를 측정 및 평가하는 것이 중요하다.

파쇄도에 대한 정량적 평가는 체거름 시험을 통한 직접적 분석을 통해 가장 정확하게 이루어질 수 있다. 그러나 이러한 체거름 시험은 일반적으로 입도가 작은 재료에 적합하며, 크기나 부피가 큰 대상에 대해서는 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 이유로, 암반공학 분야에서는 간접적인 측정 방법을 이용하여 파쇄암에 대한 정량적 분석을 수행하고 있다. 이러한 간접 측정 방법으로 사진측량기법이 가장 많이 이용되고 있는데, 기본 원리는 파쇄암들에 대하여 영상을 획득한 후, 사전 설정한 기준 척도와 비교하여 영상 내의 파쇄암의 크기를 분석하는 것이다(Van Aswegen & Cunningham, 1986). 이러한 방법에서는 기본적으로 영상의 2차원 정보를 처리하는데, 우선 영상을 이진 영상(binary image)으로 변환하고 문턱값(threshold) 설정을 통하여 영상 내에서 배경 정보를 제거함으로써 파쇄암 자료만을 분류한 후, 스케일 정보를 이용하여 크기 정보를

분석한다. 컴퓨터를 이용한 처리 기술이 발달하면서 초기의 단순 2차원 영상처리를 이용한 파쇄도 분석에서 벗어나, 2차원 영상처리기법을 이용하여 파쇄도를 자동으로 분석하고자 하는 연구들이 수행되었다. 이 기법은 영상의 밝기값 정보를 이용하여 영상 내 대상들 사이의 경계를 자동으로 구분하고, 경계 처리된 개별 대상의 정보를 분석하는 방법이다. 이러한 기술을 이용한 대표적 해석 프로그램으로는 Split Desktop, WipFrag, FragScan, GoldSize 등이 있으며, 기존의 방식과 비교하여 파쇄도를 자동으로 분석할 수 있는 장점을 가지고 있다.

Maerz 외(1996)는 WipFrag를 이용하여 파쇄암을 분석하고 이를 3차원으로 평가하는 연구를 수행하였으며, Kleine 외(1996)는 GoldSize를 이용하여 파쇄도를 평가하고 이를 통해 파쇄 모델을 예측하는 연구를 수행하였다. Split Desktop의 경우, Girdner 외(1996), Kenemy 외(2001), Siddiqui 외(2009) 등 많은 연구자들이 파쇄도 평가를 위해 이용하였고, 또 여기서 얻은 결과를 이용하여 파쇄도 모델을 예측하는 연구를 수행하였다. Al-Thyabat 외(2007)는 움직이는 컨베이어 벨트 위의 파쇄암에 대하여 영상을 취득하고, 취득 영상에 경계 추출 알고리즘을 적용하여 파쇄도를 분석하는 연구를 수행하였다. 국내의 경우, 선우춘 외(2001)는 영상처리 기법에 기반하여 파쇄도를 분석하는 연구를 수행하였으며 이를 위해 WipFrag를 이용하였다. 정영준(2002)은 Split Desktop을 이용하여 천공 패턴과 암반 조건의 변화에 따른 파쇄도 변화를 분석하였고, 박명일(2003)은 축소모형 실험을 통해 사면 형태 및 상재 하중에 따른 파쇄도 분석에 관한 연구를 수행하였다. 최용근(2005)은 Split Desktop을 이용하여 벤치 발파에서의 파쇄도를 분석하고 이를 토대로 파쇄 모델을 예측하는 연구를 수행하였다.

Liu & Tran(1996)은 이러한 2차원 기법을 이용한 해석은 통과율 50%에



서의 직경을 나타내는 평균 파쇄 직경을 해석 기법에 따라 약 50 ~ 100% 과대평가하는 것으로 보고하였다. 이러한 2차원 영상처리기법은 특성상 영상에 나타나는 대상의 경계(boundary) 및 면적(area) 정보만을 이용하기 때문에 대상의 정보를 3차원적으로 이용하지 못하는 한계점을 가지고 있으며, 또한 영상 획득 시 대상의 배치 형태 또는 영상 촬영 시 카메라의 위치 및 각도에 따라 해석 결과가 달라질 수 있다는 단점을 갖게 되어, 기존의 연구들에서는 암석의 정보를 최대한 많이 확인할 수 있도록, 주로 컨베이어 벨트나 버킷 등의 위에 평면적으로 배치된 파쇄암들에 대하여 영상을 얻고 이로부터 직경 분포를 분석하였다. 그러나 실제 발파 현장에서는 발파 후 파쇄암이 더미배치 형태로 존재하게 되므로, 이러한 발파 직후 더미배치 형태의 파쇄암에 대하여 직경 분포를 분석할 수 있다면 발파 후 신속한 파쇄도 평가가 이루어질 수 있다.

2차원 기법의 한계점을 극복하기 위하여 파쇄도를 3차원적으로 분석하고자 하는 연구들이 수행되었는데, 기본 원리는 2차원 영상처리기법을 이용하여 영상 내 대상들의 면적 정보를 얻고, 각 면적과 동일한 면적을 갖는 원에 대한 등가 직경을 계산한 후 이를 이용하여 파쇄암의 3차원 부피 정보를 계산하는 방식이다(Maerz 외, 1987; Sudhakar 외, 2006). 그러나 이러한 연구들은, 상기한 바와 같이 자료의 출처가 2차원 기법이라는 점에서 궁극적으로 대상에 대한 3차원 정보를 활용하지 못하는 한계가 있다.

최근에는 컴퓨터를 이용한 영상 해석 기술이 발달함에 따라, 대상에 대한 3차원 정보를 복원하고 이를 이용하여 파쇄도를 분석하고자 하는 연구들이 수행되고 있다. Noy(2006)는 컨베이어 벨트 위에 배치된 파쇄암에 대하여 입체사진측량기법을 이용한 파쇄도 분석에 관한 연구를 수행하였다. Müller 외(2009)는 발파 후 발생한 파쇄더미 전체에 대하여 레

이제 스캐너를 이용하여 그 부피를 분석하는 연구를 수행하였고, Thurley(2011)는 컨베이어 벨트 위에 위치한 파쇄더미에 대하여 레이저 스캐너를 이용하여 3차원 정보를 얻고, 워터셰드(watershed) 분할 기법을 이용하여 파쇄도를 분석하는 연구를 수행하였다. 한정훈 외(2011)는 입체 사진측량기법을 이용하여 파쇄암을 분석하고 이에 대한 통계 추정을 통하여 전체 파쇄도를 분석하는 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 3차원 정보를 활용한 파쇄도 분석 연구는 아직 미진한 실정이다.

이 연구에서는 입체사진측량기법을 이용하여 파쇄암의 3차원 정보를 복원하고 이를 이용하여 파쇄도를 분석하였다. 사진측량기법은 1800년대 사진술이 개발된 이후 점차 실용화되기 시작하여, 20세기에 이르러서는 사진을 수학적으로 해석하는 해석적 사진측량기법에 대한 연구가 발전하였다. 또한 관련 기술의 발달로 인하여 카메라의 성능 및 영상의 화질이 개선되면서 종래의 측량용 카메라에서 나아가, 일반 카메라로 획득한 영상의 정확도를 높이기 위한 연구(정성혁 외, 2003)들이 수행되고 있다. 이 중, 입체사진측량기법은 관심 대상에 대하여 여러 방향에서 획득한 쌍 또는 그 이상의 영상을 이용하여 대상의 3차원 정보를 복원하는 기법으로(Paul & Bon, 2000; Karl, 2007), 2차원 영상처리기법과 비교하여 보다 정확한 정보를 추출할 수 있는 장점을 가지고 있다.

암반공학 분야에서는 Hagan(1980)이 사진측량기법을 이용하여 암반의 절리 조사에 대한 연구를 수행한 이래 많은 연구자들이 사진측량기법을 이용하여 암반공학 관련 연구를 수행하였다. Tsoutrelis 외(1990)는 사진측량을 이용한 절리 조사 시스템에 관한 연구를 수행하였고, Reid 외(2000)는 에지(edge) 검출 영상처리를 통하여 영상 내에 절리선을 추출하는 연구를 수행하였다. Chen 외(2004)는 불균질 암석의 파괴 예측 모델에 관한 연구에 2차원 영상처리기법을 활용하였다. Wang 외(2005)는 영상을

이용하여 암석 파쇄를 분석하는 연구를 수행하였고, Ohnishi 외(2006)는 사진측량기법을 이용한 사면 모니터링에 관한 연구를 수행하였다. Firpo 외(2011)는 사진측량기법을 이용한 사면 안정 분석에 관한 연구를 수행하였고, Valenca 외(2013)는 암석 균열 분석에 사진측량기법을 적용하였다. 국내의 경우, 류동우 외(2000)는 입체사진측량의 원리와 2차원 영상 처리기법을 이용하여 절리면의 정보를 추출하는 연구를 수행하였고, 김종훈(2002)은 다양한 수렴각을 갖는 영상을 이용한 절리 정보 분석에 관하여 연구를 수행하였으며, 서현교 외(2012)는 3차원 모델링을 통하여 절리면의 거칠기를 측정하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 이 외에도 사진측량기법은 지형공간정보 분석을 위한 연구(유복모 외, 1999), 문화재 보존(임영빈 외, 1999) 및 모델링(공달용 외, 2010)에 관한 연구, 도로 노면 평가(장호식, 2005) 등 산업 전반에 걸쳐 활용되고 있다.

패턴 인식이란, 특정 집단에 속하는 요소들의 공통점을 찾아서 이를 패턴으로 정의하고 구분하는 기술이다. 패턴 인식은, 숫자, 글자 등의 문자 인식(Likforman-Sulem & Sigelle, 2008; Perwej & Chaturvedi, 2011), 얼굴이나 음성, 지문 등을 인식하는 생체 인식(임상균, 2000; Anusuya & Katti, 2009), 날씨 예측(Bannayan & Hoogenboom, 2008) 등의 여러 분야에서 활용되고 있으며, 유전 알고리즘을 이용한 암반 등급 예측(홍창우, 2006), 인공 신경망을 이용한 암반 사면 안정성 평가(전석원 외, 2006), 터널 변형률 예측(석태용, 2007) 등 암반공학의 여러 분야에도 적용되고 있다.

## 1.2 연구 범위 및 내용

발파 파쇄도를 분석함에 있어 경제적으로 유의미한 파쇄암의 크기는 다음과 같이 크게 세 가지로 구분할 수 있다(Cunningham, 1996).

- **Oversize:** 2차 파쇄가 필요한 정도의 크기로, 지하 광산에서는 약 300mm, 노천광산에서는 경우에 따라 1000mm 이상에 이르는 크기
- **Mid-range:** 경제적 가치가 가장 높은 크기
- **Fines:** 크기가 매우 작아서 처리하기 어렵고 거래도 이루어지지 않는 입자 크기로, 일반적으로 석탄이나 백운석에서는 최소 6mm, 금광석에서는 1mm 정도에 이르는 크기

파쇄 효율은 일반적으로 ‘oversize’ 파쇄암의 발생량에 따라 달라지는데, 특히 채석 발파에서 발파 후 발생한 파쇄암의 크기가 ‘oversize’ 이상이 되는 경우 2차 파쇄를 필요로 하게 되므로, 이러한 ‘oversize’는 전체적인 적재 및 운송 시스템 설계에 매우 중요한 요소가 된다(Sirotyuk, 1970; Maclachlan & Singh, 1989). 따라서 이 연구에서는 효율적인 파쇄 크기인 ‘mid-range’와 더불어 상기한 바와 같이 전체적인 발파 파쇄 설계에 중요한 영향을 미치는 크기인 ‘oversize’의 파쇄암에 대하여 파쇄도를 분석하는 연구를 수행하였다.

전술한 바와 같이 파쇄암에 대해서는 크기 및 부피의 제약으로 인해 체거름 시험을 통한 분석이 어렵기 때문에, 이 연구에서는 입체사진측량 기법을 이용하여 파쇄암의 3차원 정보를 복원하고 이를 이용하여 파쇄도를 분석하는 연구를 수행하였다. 우선 입체사진측량기법을 이용한 파쇄도 분석 결과를, 수조를 이용한 측정 자료 및 2차원 영상처리기법을 이용한 파쇄도 분석 결과와 비교함으로써 입체사진측량기법을 이용한 파쇄

도 분석의 적용성을 평가하였다. 파쇄암의 배치 형태는, 컨베이어 벨트 상의 배치 형태와 같은 평면배치와 발파 현장에서와 같은 더미배치의 2 가지 배치 형태에 대하여 파쇄도를 분석하였는데, 더미배치에서는 더미 외측으로 확인되는 블록들의 정보에 기초하여 더미 전체의 직경 분포를 통계적으로 추정하는 연구를 수행하였다. 마지막으로, 입체사진측량기법을 이용하여 복원한 파쇄 더미의 3차원 정보로부터 개별 파쇄암 사이의 공통점을 분석하여, 전체 파쇄 더미에서 개별 파쇄암 블록들을 구분하는 알고리즘을 개발하였다. 블록 분할 알고리즘과 입체사진측량기법을 이용한 파쇄도 분석 원리를 통합하여 3차원 파쇄도 분석 기법을 완성하고, 선행한 파쇄도 분석 자료에 적용함으로써 이 연구에서 개발한 파쇄도 분석 기법의 적용성을 검토하였다.

## 2. 기초 이론

### 2.1 파쇄도 분석 방법

발파 파쇄 더미에 대한 파쇄도 분석은 분석 방법이나 분석 자료에 따라 몇 가지 방법으로 분류된다. 일반적으로 전체 파쇄 더미에 대한 정량적인 파쇄도 분석은 현실적으로 불가능하다고 할 수 있으나, 대표적으로 이용되는 파쇄도 분석 방법은 다음과 같다(한공창 외, 1997).

1. 육안 분석: 암석의 표면 관찰에 기초한 분석이다. 수행이 용이한 분석 방법이지만, 평가자에 의한 주관적 해석이 되기 쉽다.
2. 영상 분석: 사진측량의 원리를 이용한 분석법으로, 파쇄암에 대하여 영상을 취득하고, 취득 영상을 균등 크기의 격자로 나누어 격자의 크기와 개수를 기준으로 하여 영상 내 파쇄암의 크기를 분석한다. 영상의 경계 처리 기법을 이용하면 파쇄암의 크기를 자동으로 분석할 수 있다.
3. 재래식 혹은 초고속 항공사진 측량: 파쇄암에 대한 3차원 정보를 분석할 수 있으므로 부피 정보를 분석할 수 있다.
4. ‘oversize’ 옥석 집계: ‘oversize’로 정의된 파쇄암의 수를 조사한다. 이러한 파쇄암에 대한 길이, 폭, 두께 등의 정보를 분석한다.

5. 2차 발파에서의 화약 소모량: 거대한 크기의 파쇄암이 발생하는 경우에는 2차 발파를 실시하게 되며, 이 때 사용된 화약량을 기록한다.
6. 쇼벨 적재 속도: 파쇄도가 좋을수록 적재가 빠르게 이루어진다는 것을 기본 원리로 한다. 적재 속도에 영향을 주는 파쇄암의 특성이나 'oversize' 파쇄암의 발생량 등을 기록한다.
7. 분급: 파쇄도를 정량적으로 가장 정확히 평가할 수 있는 분석 방법이다. 그러나 대규모의 발파 현장에는 적합하지 않으며, 시간이 많이 소요되는 분석법이다.

## 2.2 입체 영상 정합을 이용한 3차원 정보 복원 이론

인간이 공간상에서 물체의 원근감을 얻을 수 있는 것은 양쪽 눈으로 사물을 보기 때문이다. 반면 카메라를 이용하여 얻어진 사진(정지 영상)은 모든 물체가 평면의 상 위에 표현되므로 입체감을 표현할 수 없다. 따라서 카메라로 획득한 영상들을 이용하여 3차원 공간을 재현하기 위해서는, 인간이 물체의 원근감을 느끼는 원리인 쌍안시의 개념을 도입할 필요가 있다. 입체사진측량기법은 기본적으로 이러한 쌍안시의 원리를 이용한 사진측량기법으로, 동일 대상에 대하여 다양한 각도에서 촬영한 여러 장의 사진을 이용하여 대상의 3차원 정보를 추출하는 기법이다. 영상 촬영 시 이상적인 조건의 스테레오 촬영이 되도록 하거나 영상 사이의 공액 기하(epipolar geometry) 조건을 이용하여 3차원 정보를 얻을 수 있다. 3차원 공간 정보를 추출하기 위해서는 하나의 기준 영상에 나타난 관심점이 상관 영상에서 어느 곳에 위치하고 있는가를 알아야 한다. 영상에 나타나는 이러한 동일점을 공액점(conjugate point)이라 하는데, 종래의 기계적 및 해석적 사진측량에서는 공액점을 찾는 과정을 인간이 직접 수행한 반면, 최근에는 기술의 발전으로 디지털 사진측량 기술이 보편화됨에 따라 컴퓨터에 의한 자동화 처리가 가능하게 되었다. 일반적으로 이러한 처리 과정을 영상 정합이라 부르며, 대상물의 3차원 정보를 추출 및 분석하기 위한 가장 주요한 기술이다.

### 2.2.1 공액 기하

영상 정합은 기준 영상과 상관 영상의 대응점을 찾는 과정으로 설명할 수 있다. 그러나 기준 영상의 관심점에 대한 대응점을 상관 영상 전체에



서 찾는 작업은 매우 많은 계산을 필요로 하게 되며 또한 부정확한 결과로 나타날 확률이 높다. 따라서 상관 영상에서 대응점을 탐색하는데 있어 탐색 영역을 제한할 수 있다면 보다 효율적인 영상 정합을 수행할 수 있을 것이다. 이처럼 탐색 영역을 최소화하고 영상 정합의 효율을 높이기 위한 방법으로는 영상 사이의 공액 기하를 이용하여 탐색 범위를 제한하는 방법과 스테레오 카메라를 이용하여 취득한 영상을 이용하는 방법이 있다.

그림 2.1은 단렌즈 카메라를 이용하여 영상을 취득하는 일반적인 방법을 보여준다. 일반적인 경우, 그림과 같이 두 사진기축이 평행하지 않고 카메라와 대상 사이의 수렴각( $\phi_1, \phi_2$ ) 및 거리(depth, 투영 중심으로부터 대상까지의 거리)가 서로 다르게 촬영된 영상을 얻게 되는데, 이렇게 취득한 영상을 정합하기 위해서는 영상 사이의 공액 기하를 이용한 전처리 과정을 거쳐야 한다.

공액 기하(Epipolar Geometry)란 두 개의 투영 중심( $O_1, O_2$ )과 대상점( $P$ ), 그리고 각 영상에 나타나는 영상점( $p_1, p_2$ )들이 공통의 한 평면(coplanar) 상에 존재한다는 이론이며, 그림 2.2는 일반적인 경우의 공액 기하를 나타낸다. 여기서 두 개의 투영 중심을 잇는 선(기선, baseline)이 각 영상면과 만나는 점을 에피폴(epipole,  $e_1, e_2$ )이라 하며, 공액면(epipolar plane)과 각 영상이 만나 이루는 교선( $\overline{p_1e_1}, \overline{p_2e_2}$ )을 공액선(epipolar line)이라 한다.

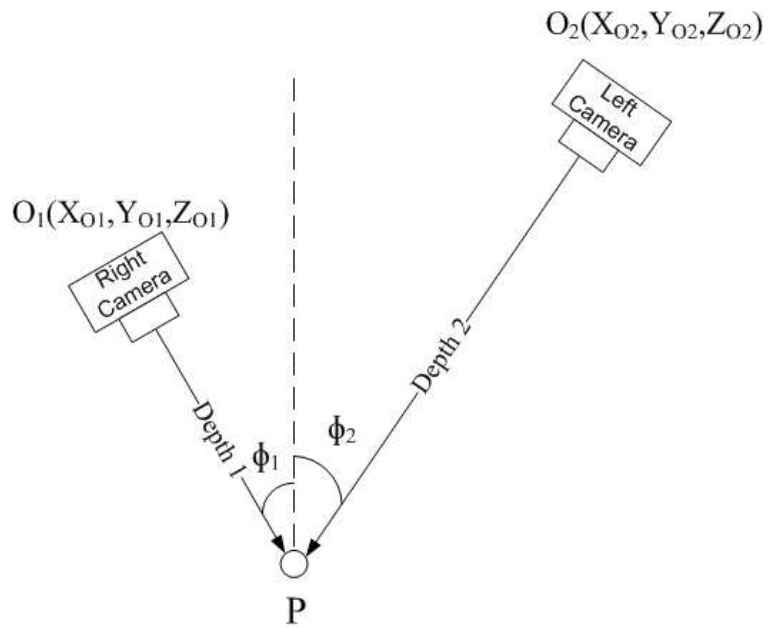


Fig. 2.1 General type of photography

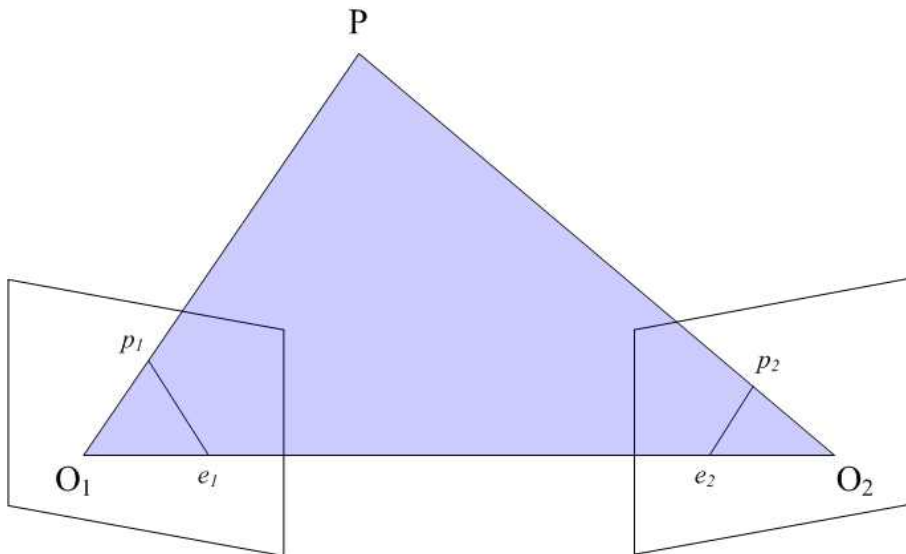


Fig. 2.2 Epipolar geometry

영상 사이의 공액 관계를 형성시키기 위한 제약 조건(constraint)으로 공면 조건(coplanarity condition)을 이용하게 되는데, 3차원 공간상에서 평면의 방정식의 일반식이  $AX+BY+CZ+D=0$ 이라 할 때, 그림 2.2에서 두 개의 투영 중심과 영상점들이 동일 평면에 존재하기 위한 조건은 식 (2.1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_{O_1} & Y_{O_1} & Z_{O_1} & 1 \\ X_{O_2} & Y_{O_2} & Z_{O_2} & 1 \\ X_{p_1} & Y_{p_1} & Z_{p_1} & 1 \\ X_{p_2} & Y_{p_2} & Z_{p_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서 두 개의 투영 중심과 영상점들이 동일 평면 내에 존재하기 위한 조건, 즉 공면 조건을 적용하면 식 (2.2)가 성립하게 된다.

$$\begin{bmatrix} X_{O_1} & Y_{O_1} & Z_{O_1} & 1 \\ X_{O_2} & Y_{O_2} & Z_{O_2} & 1 \\ X_{p_1} & Y_{p_1} & Z_{p_1} & 1 \\ X_{p_2} & Y_{p_2} & Z_{p_2} & 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.2)$$

이와 같은 공액 기하 제약을 이용하면, 기준 영상에의 관심점( $p_1$ )에 대한 탐색이 상관 영상의 공액선( $\overline{p_2e_2}$ ) 상으로 제한되는 이점을 얻을 수 있다. 그러나 그림 2.1과 같이 촬영된 영상을 이용하는 경우에는, 상관 영상에서의 공액선이 일정 기울기를 갖게 되며, 이는 두 영상을 정합하는데 있어  $y$ 축 시차까지 고려해야 하는 불편을 초래한다. 따라서 하나의 기준 좌표계에 대하여 두 영상의 좌표계를 통일함으로써 두 영상의  $y$ 축

시차를 제거한다. 일반적으로 두 영상 중 기준 영상에 대하여 상관 영상의 좌표계를 통일하는 방법으로  $y$ 축 시차를 제거하게 되며, 이러한 전처리 과정을 통하여 두 영상의 공액선이 영상 좌표계의  $y$ 축에 대하여 동일한 좌표를 갖도록 하고 또한  $x$ 축과 평행하도록 변환시킨다. 이러한 과정을 통하여 상관 영상에서의 탐색을 1차원으로 제한할 수 있다. 이처럼 한 쪽 영상의 좌표계에 대하여 다른 한 쪽의 좌표계를 일치시키는 과정을 종속적 상호표정이라 하며, 이러한 과정을 통하여 영상 사이의 기하 왜곡을 보정하고 그림 2.1과 같은 방법으로 촬영된 일반 영상들을 영상 정합을 위한,  $y$ 축 시차가 제거된 공액 기하 상태의 영상으로 변환시킬 수 있다.

영상 사이의 기하 왜곡을 보정하기 위하여 다음의 과정을 수행한다. 우선 두 영상의 축척이 같아지도록 한 쪽의 영상을 보정한다. 만약 두 영상의 축척이 동일하지 않은 경우, 그림 2.3과 같이 기준 영상과 상관 영상에서의 영상소(pixel)가 서로 다른 영역 및 크기를 가지게 되어 영상소 단위의 비교가 불가능해지므로 기준 영상에 대하여 상관 영상이 동일한 축척을 갖도록 보정한다.

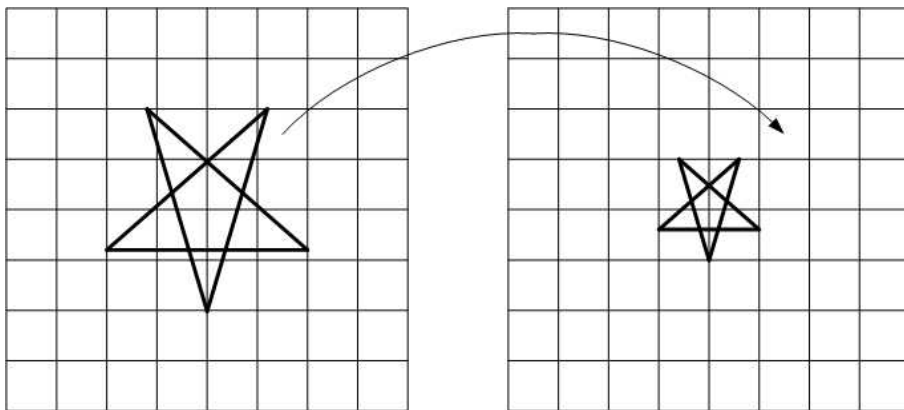


Fig. 2.3 Scale-induced distortion

다음으로 한 쌍의 영상을 촬영한 카메라의 위치 및 회전각이 다른 경우, 기준 영상과 같은 좌표계를 갖도록 상관 영상을 보정한다. 그림 2.4와 같이 상관 영상의  $x(\omega)$ ,  $y(\phi)$ ,  $z(\kappa)$  각 축에 대하여 회전 행렬을 구성하여 두 영상 사이의 회전 변환을 수행하며, 식 (2.3), (2.4), (2.5)는 각 축에 대한 회전 행렬을 나타낸다.

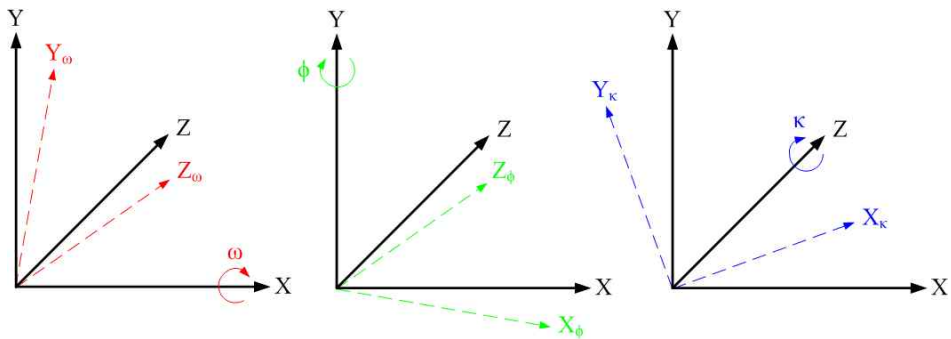


Fig. 2.4 Axial rotation

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$R_{\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

순서대로  $x, y, z$  축에 대하여 회전을 수행하면 전체 회전 행렬  $R$ 은 식 (2.6)과 같이 구성된다.

$$\begin{aligned}
 R &= R_{\omega\phi\kappa} & (2.6) \\
 &= R_{\kappa}R_{\phi}R_{\omega} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\kappa\cos\phi & \cos\kappa\sin\phi\sin\omega - \sin\kappa\cos\omega & \cos\kappa\sin\phi\cos\omega + \sin\kappa\sin\omega \\ \sin\kappa\cos\phi & \sin\kappa\sin\phi\sin\omega + \cos\kappa\cos\omega & \sin\kappa\sin\phi\cos\omega - \cos\kappa\sin\omega \\ -\sin\phi & \cos\phi\sin\omega & \cos\phi\cos\omega \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

두 영상의 사진기축이 평행하게 촬영된 영상인 경우에는 상관 영상의 좌표계를 기준 영상의 좌표계와 동일하도록 변환시키며, 사진기축이 평행하지 않은 경우에는 우선 두 영상을 수직사진 영상으로 변환시킨 후 다시 공액 영상으로 변환시키게 된다. 이러한 변환을 통하여, 기준 영상에서의 관심점에 대한 상관 영상의 탐색을 기준 영상의 관심점이 위치하는 행과 동일 행으로 제한시킬 수 있다.

그림 2.5는 스테레오 촬영 조건을 나타낸다. 이처럼 카메라의 두 광축이 평행하고 대상까지의 거리가 동일하게 유지된 상태에서 동시에 촬영된 한 쌍의 스테레오 영상을 이용하는 경우에는, 촬영된 영상이 이미 영상 정합을 위한 공액 기하 상태의 영상이라 할 수 있으므로 영상의 기하학적 왜곡 보정 작업을 수행하지 않고 수평 시차 탐색을 통하여 영상 정합을 수행할 수 있다.

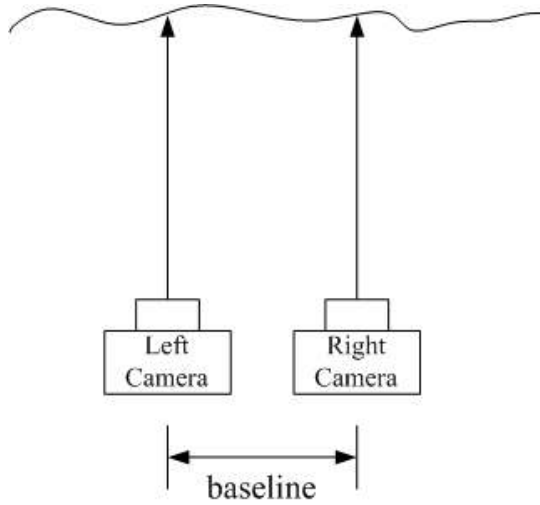


Fig. 2.5 Photography condition for a stereo-image

### 2.2.2 영상 정합 기법

영상 정합 기법은 크게 영역 기준 정합(area-based matching)과 형상 기준 정합(feature-based matching)으로 분류된다. 영역 기반 정합 기법은 스테레오 영상에서 대상체에 대한 영상소의 밝기값을 이용하여 공액점을 찾는 정합 기법이다. 우선 스테레오 영상 중 하나의 기준 영상에 일정 크기의 영역을 설정하고 이에 대한 상관 영상에 탐색 영역을 설정한다. 이 후 일정 범위에서 탐색 영역을 이동시키며 영상소의 밝기값 비교를 통하여 상관성이 높은 대응점을 결정한다. 형상 기준 정합 기법은 경계선, 모서리 등 영상에 공통적으로 나타나는 특징들을 대응시키는 기법으로, 영상 정합을 위한 전처리 과정에서 각 영상에서 확인되는 특징들을 추출해야 한다. 예를 들어 경계선은 영상 내에서 밝기값이 급격히 변하는 점들을 연결하여 추출하게 된다. 이후 추출된 특징들의 위치, 길이, 방향 등의 정보를 비교하여 정합을 수행하게 된다. 영역 기준 정합 기법

이 두 영상의 전체 범위에서 정합을 수행하는데 반해, 형상 정합 기법은 두 영상에 나타나는 특징들의 비교를 통하여 영상 내 다른 점들의 관계를 계산하게 된다.

정확한 스테레오 촬영이 이루어져 기하학적 왜곡 보정이 필요하지 않은 스테레오 영상에 대하여 영상 정합을 수행할 때, 기본적으로 기준 영상과 상관 영상의 모든 영상소의 밝기값이 동일하다면 유사성이 최대가 될 것이다. 그러나 이는 실제 발생하기 어려운 이상적인 경우이므로, 영상의 정합도를 향상시키기 위해서는 영상의 획득뿐만 아니라 영상의 기하학적 왜곡 보정 작업에 주의를 기울여야 한다. 또한 내부표정을 수행하여 카메라의 내부표정요소를 구하고 이를 통해 카메라의 왜곡을 보정해야 한다. 측량용 카메라는 제작사에 의해 정밀 검정이 이루어진 내부표정요소가 제공된다. 반면, 최근에는 기술의 발달로 인하여 비측량용 카메라의 안정성이 향상됨에 따라 일반 디지털 카메라로 취득한 영상의 활용도가 높아지고 있는데, 이러한 비측량용 카메라의 경우에는 많은 경우 고가의 측정 장비의 도움을 빌리지 않고 검정판(calibration board)을 이용한 자가 검정(self-calibration)을 통하여 내부표정요소를 얻고 있다.

### 2.2.3 블록 매칭

영상 정합을 통하여 거리 정보를 추출하기 위해서는 스테레오 영상 사이에 대응점을 찾는 과정이 정확하게 수행되어야 한다. 일반적으로 기준 영상과 상관 영상에서 대응점 사이의 밝기값에 큰 차이가 없다고 가정하고 영상 정합을 수행하게 되며, 따라서 밝기값의 차이가 0에 가까울수록 두 점이 일치할 확률이 높다는 것을 의미한다. 그러나 단순히 화소대 화소 사이의 밝기값만을 비교하는 방식은 안정적인 결과를 보장하지



못하므로, 일반적으로 관심 화소와 주위 화소를 함께 고려한 영상 정합을 수행한다. 기준 영상의 관심점이 상관 영상의 어느 곳에 위치하는지를 찾기 위하여, 우선 기준 영상에 관심점과 그 주위의 일정 영역을 포함하는 마스크(mask 또는 template)를 설정한다. 다음으로 상관 영상에 동일 크기의 마스크를 설정하고 이 마스크를 이동하면서, 마스크 내 모든 화소들의 밝기값을 일정 관계식을 기준으로 기준 영상 마스크의 밝기값과 비교하여 가장 차이가 적은 곳을 대응점으로 결정한다. 이와 같이 스테레오 영상에 일정 크기의 마스크를 설정하고 이의 비교를 통하여 영상 정합을 수행하는 것을 블록 매칭(block matching)이라 하며, 영상 전체에 대하여 영상 정합이 이루어지는 영역 기반 방식의 영상 정합 기법이다. 일반적으로 다음의 관계식을 이용한다.

블록 매칭의 기준으로 대표적으로 SAD(Sum of Absolute Difference), SSD(Sum of Squared Difference), MAD(Mean Absolute Difference), MSD(Mean Squared Difference)의 관계식이 이용된다. SAD는 관심 영상과 상관 영상에 설정한 마스크에서 각 화소에 대한 밝기값 차이의 절대값의 합이 최소가 되는 곳을 최적의 대응점으로 설정하는 방식이며, SSD는 각 화소에 대한 밝기값 차이의 제곱의 합이 최소가 되는 곳을 대응점으로 설정하는 방식이다. MAD와 MSD는 각각 SAD, SSD에서의 합의 평균값을 이용하는 방식이다. 마스크의 가로, 세로 크기를 각각  $M$ ,  $N$ 이라 할 때, 이 관계식들은 식 (2.7), (2.8), (2.9), (2.10)과 같이 표현된다.

$$SAD = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} |f_l(i, j) - f_r(i+x, j+y)| \quad (2.7)$$

$$SSD = \sum_{i=0}^{M-1N-1} \sum_{j=0}^{M-1N-1} (f_l(i,j) - f_r(i+x,j+y))^2 \quad (2.8)$$

$$MAD = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1N-1} \sum_{j=0}^{M-1N-1} |f_l(i,j) - f_r(i+x,j+y)| \quad (2.9)$$

$$MSD = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1N-1} \sum_{j=0}^{M-1N-1} (f_l(i,j) - f_r(i+x,j+y))^2 \quad (2.10)$$

여기서,  $f_l(i,j)$ 과  $f_r(i,j)$ 은 각각  $(i,j)$ 에서의 왼쪽 영상(기준 영상)과 오른쪽 영상(상관 영상)에서의 밝기값을 나타낸다.  $y$ 축 시차가 제거된 영상에 대하여 수평 시차  $d$ 를 이용하여 표현하면, 상기의 관계식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SAD = \sum_{i=0}^{M-1N-1} \sum_{j=0}^{M-1N-1} |f_l(i,j) - f_r(i+d,j)| \quad (2.11)$$

$$SSD = \sum_{i=0}^{M-1N-1} \sum_{j=0}^{M-1N-1} (f_l(i,j) - f_r(i+d,j))^2 \quad (2.12)$$

$$MAD = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1N-1} \sum_{j=0}^{M-1N-1} |f_l(i,j) - f_r(i+d,j)| \quad (2.13)$$

$$MSD = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1N-1} \sum_{j=0}^{M-1N-1} (f_l(i,j) - f_r(i+d,j))^2 \quad (2.14)$$

## 2.2.4 시차 지도를 이용한 3차원 공간 재현

스테레오 영상을 이용하여 3차원 공간을 재현하는 원리는, 영상 정합 과정을 통하여 좌·우 스테레오 영상에서 각 대응점을 찾고 이의 위치 차이를 이용하여 공간 정보를 계산하는 것이다. 기준 영상에서의 점  $p(x, y)$ 가 상관 영상에서 점  $p'(x', y')$ 에 투영되었다고 하면 두 점의 위치 차이, 즉 변위(disparity, 또는 시차)를 이용하여 공간 정보를 계산하게 된다. 이처럼 영상의 각 점에서의 변위를 계산하여 이를 영상으로 표현한 것을 시차 지도(disparity map)라 한다. 2.1.1절에서 기술한 바와 같이, 스테레오 영상의 기하 왜곡이 보정되고  $y$ 축 시차를 제거한 공액 기하 상태의 영상 또는 평행 촬영 조건으로 얻어진 영상을 이용하여 시차 지도를 생성하면 다음과 같이 삼각형의 닳음비를 이용하여 영상 각 점에서의 공간 정보를 추출할 수 있다. 그림 2.6은 기술한 조건의 영상에 대한 삼각형의 닳음 조건을 나타낸다. 두 카메라의 광축은 평행이며,  $O_1$ 은 왼쪽 영상의 카메라 노출점,  $O_2$ 는 오른쪽 영상의 카메라 노출점,  $B$ 는 카메라 사이의 거리, 즉 기선 거리를 나타낸다.  $f$ 는 초점 거리이며,  $X$ 는 왼쪽 영상 좌표계를 기준으로 한 대상점  $P$ 의  $x$  좌표,  $Z$ 는 대상점  $P$ 의  $z$  좌표를 나타낸다.  $y$ 축 시차를 제거하였으므로  $x$ 축 시차, 즉  $x$ 축 변위만을 고려한다. 왼쪽 영상에 투영된 대상점  $P$ 의  $x$  좌표를  $x_1$ , 오른쪽 영상에 투영된  $x$  좌표를  $x_2$ 라 하면, 왼쪽 영상에서의 닳음비를 이용하여 식 (2.15)를 얻을 수 있고, 오른쪽 영상에서의 닳음비를 이용하여 식 (2.16)을 얻을 수 있다. 식 (2.17)은 두 영상에서 대상점  $P$ 에 대한 영상 좌표의  $x$ 축 변위( $d$ )를 나타내며, 이로부터 식 (2.18)을 얻을 수 있다. 영상 정합을 통하여 스테레오 영상에 대한 시차 지도를 얻게 되면, 식 (2.18)의 관계를 이용하여 스테레오 영상을 3차원 공간으로 재현할 수 있다.

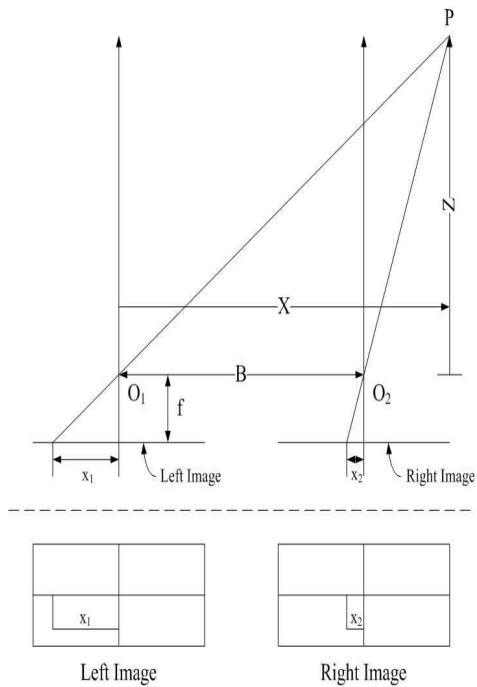


Fig. 2.6 Coordinate determination using the ratio of similitude

$$\frac{Z}{X} = \frac{f}{x_1} \quad (2.15)$$

$$\frac{Z}{X-B} = \frac{f}{x_2} \quad (2.16)$$

$$d = x_1 - x_2 = f \cdot \frac{B}{Z} \quad (2.17)$$

$$Z = f \cdot \frac{B}{x_1 - x_2} = f \cdot \frac{B}{d} \quad (2.18)$$

## 2.3 파쇄도 분석을 위한 영상 분할 이론

색상을 표현하는 컬러 모델은 그 쓰임에 따라 몇 가지 방법으로 표현할 수 있다. RGB와 HSV는 대표적인 컬러 모델로, RGB는 빨강(red), 초록(green), 파랑(blue)으로 표현되는 모델을 말하며, HSV는 색도(hue), 채도(saturation), 명암(value)으로 표현되는 모델을 말한다. 한편, 2차원 영상 처리기법을 이용한 파쇄도 분석에서는 문턱치(threshold) 처리를 통한 영상 내 에지(edge) 검출 기법을 이용하는데, 에지 검출 기법에서는 기본적으로 그레이 스케일(gray scale) 영상이 이용된다. 그레이 스케일 영상에서는 영상의 색상 정보가 흰색에서 검정색 사이의 점진적인 변화만으로 표현되는데, 이는 밝기값의 변화로 표현할 수 있으며, 이러한 밝기값의 변화를 통해 영상에서 에지를 검출하게 된다. 에지 검출을 통해 경계가 추출된 결과 영상은 일반적으로 이진 영상(binary image)으로 나타난다. 이진 영상이란 영상을 흑과 백의 두 가지 값으로만 표현한 영상을 말하며, 수치적으로는 0과 1로 표현된다. 정리하면, 파쇄도 분석에서 이용되는 2차원 영상처리기법은, 초기 획득한 컬러 영상을 밝기값의 변화로 표현되는 그레이 스케일 영상으로 변환하고, 이후 에지 검출을 통해 결과 영상을 이진 영상으로 표현한 후, 이로부터 영상의 경계를 처리하는 기법이다.

영상에서 배경으로부터 관심 대상을 구분하거나 크기 등의 관심 대상 정보를 확인하기 위해 에지를 검출하는데, 에지란, 영상 내의 밝기가 주변 밝기와 차이가 큰 곳, 즉 밝기가 급격히 변하는 곳을 말한다. 밝기를 수치로 표현하면, 영상 내에서 밝기값이 변하지 않는 곳은 기울기가 0으로 나타나고, 밝기가 변하는 곳에서는 일정 경사도를 갖게 된다. 영상  $f$ 의  $x$ ,  $y$ 축 방향으로 밝기값에 대한 기울기는 식 (2.19)와 같다. 이렇게

영상의  $x, y$ 축 방향으로의 1차 미분 연산자를 이용하여, 식 (2.20), (2.21)과 같이 영상 전반에 대하여 그 크기와 방향을 계산하고, 문턱치와의 비교를 통해서 에지를 검출한다. 정리하면, 1차 미분 연산자를 이용한 에지 검출 기법은, 식 (2.21)의 크기와 식 (2.20)의 방향을 갖는 식 (2.19)의 영상의 기울기 벡터를 이용하여 에지를 검출하는 기법이다.

$$\nabla f = \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \quad \frac{\partial f}{\partial y} \right] \quad (2.19)$$

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{\partial f / \partial y}{\partial f / \partial x} \right] \quad (2.20)$$

$$\| \nabla f \| = \sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2} \quad (2.21)$$

1차 미분 연산자는 식 (2.19)와 같이 가로 검출기와 세로 검출기로 이루어져 있으며, Prewitt 연산자, Sobel 연산자, Roberts 연산자 등이 대표적이다. Prewitt 연산자는 수평 및 수직 방향의 에지 검출이 유리한 반면 대각선 방향의 에지 검출이 어렵고, Sobel 연산자는 수평, 수직 및 대각선 방향으로의 에지 검출이 가능하나 연산 속도가 비교적 느리다. Roberts 연산자는 마스크의 크기가 작고 수행 속도가 빠르지만 경계가 확실한 에지만 추출할 수 있는 특징이 있다. 그림 2.7은 이러한 1차 미분 연산자를 나타낸다.

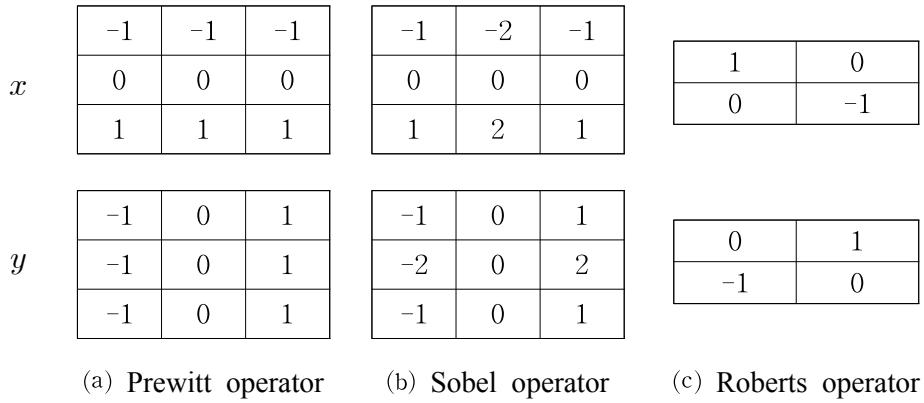


Fig. 2.7 First-order derivative operators for an edge detection

이러한 1차 미분 연산자를 이용한 에지 검출은 상기한 바와 같이 밝기 값의 변화를 이용한 기법이므로, 결과적으로 수평, 수직, 대각 방향으로의 밝기값에 민감하게 반응하여 전체적으로 에지가 두껍게 추출된다. 이를 보완하기 위하여 2차 미분 연산자를 이용하게 되는데, 이는 영상의 밝기값이 변화하는 속도를 고려한 방식으로, 1차 미분 연산자와 비교하여 에지 검출을 둔화시키며 추출된 에지가 전체적으로 연결되는 장점을 갖는다. 각 축 방향으로 2차 미분 연산 후 그 값을 더한 것을 라플라시안(Laplacian)이라 하며, 영상  $f$ 에 대한 라플라시안은 식 (2.22)와 같다.

$$\nabla^2 f = \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right] \quad (2.22)$$

라플라시안은 날카로운 에지 추출이 가능하고, 1차 도함수와 비교하여 등방성 필터라는 장점을 가지고 있으나, 모든 2차 필터는 잡음에 매우 민감하다(McAndrew 외, 2010). 따라서 입력 영상에 대하여 잡음을 우선

제거한 후에 라플라시안 필터를 적용한다. 이를 LoG(Laplacian of Gaussian) 필터라 하는데, 이는 입력 영상에 대하여 가우시안 필터를 적용하여 잡음을 제거하고 이 영상에 라플라시안 필터를 적용하는 기법이다. 그림 2.8은 라플라시안 필터를 나타낸다. 또한 2차 미분 연산 후 에지의 위치는, 그림 2.9와 같이 값이 0이 되는 곳이다. 따라서 2차 미분 연산에서는 이러한 영 교차(zero crossing) 화소들을 구함으로써 에지를 검출할 수 있다. 입력 영상에 가우시안 필터를 적용하여 영상의 잡음을 제거하고 라플라시안 필터를 적용한 후에, 이러한 영 교차 화소들을 구하는 전체 과정을 Marr-Hildreth 방법이라 한다.

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

Fig. 2.8 Laplacian filters

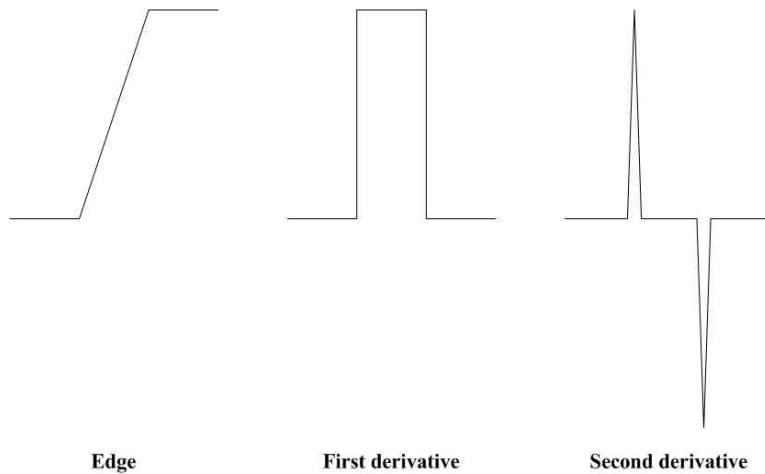


Fig. 2.9 Derivatives of an edge function (McAndrew et al., 2010)



## 2.4 패턴 인식을 이용한 자료 분류

패턴 인식이란, 관심 집단에 대하여 요소들 사이의 공통점을 찾고 이를 기준으로 자료를 분류하는 기술이다. 패턴 인식 시스템의 설계는 다음과 같이 크게 5 단계로 구분된다(Duda 외, 2001).

1. 자료 수집: 안정된 시스템의 성능을 위해서는 자료 수집 단계에서 가능한 한 많은 수의 자료를 수집해야 한다. 전형적인 자료 특성이 예상되는 경우에는 간단한 모델 시험을 수행해 볼 수 있으나, 궁극적으로는 시스템을 대표할 수 있는 충분히 많은 수의 자료를 확보해야 한다.
2. 특징 선택: 시스템 설계에 가장 중요한 단계이며, 관심 대상에 대한 분석을 통하여 적절한 사전 지식을 확보하는 것이 중요하다. 간단하고, 노이즈에 강건한 공통의 특징을 선택하는 것이 중요하다.
3. 모델 선택: 실제 대상의 분포 정보를 알지 못하는 상태에서는 사전 선택한 모델의 성과를 판단할 수 없으므로, 대상에 대한 분석을 통해 적절한 모델을 선택하는 것이 필요하다.
4. 훈련: 학습을 통하여 가장 효과적인 분류기(classifier)를 개발하는 단계이다.
5. 평가: 시스템의 성능을 평가하고, 필요에 따라 시스템의 구성 요소를 개선하는 단계이다.

패턴 인식 시스템 설계를 위해 대표적으로 이용되는 자료 접근 방법은 다음과 같다(한학용, 1999).

1. 템플릿 정합법: 패턴 인식 접근법 중 가장 쉬운 접근법으로, 대상에 대한 특징을 템플릿으로 설정하고 새로 입력되는 자료를 사전 설정한 템플릿과 비교하여 자료를 분류하는 방법이다. 일반적으로 간단한 알고리즘으로 구성할 수 있으며, 일반화된 템플릿을 설정하는 것이 중요하다.
2. 통계적 접근법: 관심 대상에 대한 분포를 통계적으로 분석하고, 분석한 통계 모델을 기초로 최우추정 등의 과정을 통해 대상에 대한 확률 밀도함수를 결정하는 방법이다.
3. 신경망 접근법: 인간 뇌의 사고방식을 컴퓨터를 이용하여 모방하는 방법으로, 생물학적 신경 세포인 뉴런을 인공적으로 모델링하여 관심 대상에 대한 학습을 수행하고 자료를 분류하는 방법이다.
4. 구조적 접근법: 관심 대상 자료들이 갖는 구조적 유사성을 찾고 이를 바탕으로 자료를 분류하는 방법이다. 특정 대상이 갖는 명확한 구조적 특성을 분석 및 정의하는 과정이 중요하다.

### 3. 2차원 영상을 이용한 파쇄도 분석

2차원 영상처리 소프트웨어를 사용하여 파쇄도를 분석하였다. 평면배치와 더미배치 형태의 암석에 대하여 파쇄도를 분석하였으며, 이 결과를 수조를 이용하여 측정한 결과와 비교하였다.

#### 3.1 영상 획득 장비

카메라는 약 천만 화소수를 가지는 디지털 일안반사식 카메라 Nikon D200을 이용하였고, 렌즈는 Nikon AF-S DX 18-70 mm (f/3.5-4.5G IF-ED)를 사용하였다. 사용된 렌즈는 일반적으로 사용되는 표준 줌 렌즈로서, 초점 거리 18 ~ 70 mm, 화각 76° ~ 22°50'의 범위를 가진다. 표 3.1, 3.2는 각각 카메라와 렌즈의 제원을 나타낸다. 카메라로 취득한 영상의 크기에 대하여, 2차원 영상처리기법을 이용한 연구에는 이 연구에서 사용한 프로그램 상의 제약으로 인해 최소 크기(S)의 영상을 이용하였고, 입체사진측량기법을 이용한 연구에는 최대 크기(L)의 영상을 이용하였다.

Table 3.1 Camera specification, Nikon D200

Camera type	Digital single-lens reflex camera
Effective pixels	10.2 million
Image sensor	RGB CCD: 23.6 × 15.8 mm Total pixels: 10.92 million
Image size (pixels)	3,872×2,592 (L), 2,896×1,944 (M), 1,936×1,296 (S)
Picture angle	The equivalent in 35 mm format is approx. 1.5 times lens focal length.

Table 3.2 Lens specification, Nikon AF-S DX 18-70 mm (f/3.5-4.5G IF-ED)

Focal length	18-70 mm
F-Number	3.5 - 4.5
Maximum aperture	f/3.5 - 4.5
Minimum aperture	f/22 - 36
Picture angle	76° - 22°50'
Lens construction	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ 15 elements in 13 groups</li> <li>▸ Three ED glass elements</li> <li>▸ One aspherical lens element</li> </ul>

### 3.2 2차원 파쇄도 분석 방법

2차원 파쇄도 분석을 위하여 Split Desktop을 이용하였다. Split Desktop은 파쇄암 입도 분포 분석 전용 프로그램으로서 2차원 영상처리에 기초한 해석 프로그램이다. 영상 취득 시 스케일링 지표로 활용될 물체를 관심 대상 주위에 배치한 후 함께 영상을 취득하는데, 이 연구에서는 크기를 알고 있는 농구공을 스케일링 지표로 활용하였다. 입력된 영상에 대하여 스케일링을 수행한 후, 2차원 경계 추출 기능을 이용한 자동 필러링(auto-delineation)을 통해 1차적으로 대상물들의 경계를 추출한다. 다음으로, 1차 결과물에 대하여 사용자의 입력을 통하여 2차 경계 수정 작업(manual editing)을 수행한 후, 결과 분석을 통하여 파쇄암의 최종 입도 분포 해석 자료를 얻게 된다. 그림 3.1은 Split Desktop의 프로그램 처리 순서를 나타낸다.

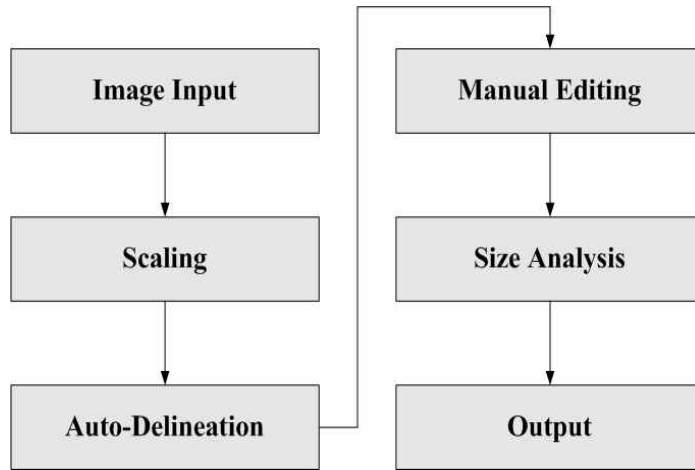


Fig. 3.1 Flowchart in Split Desktop

Split Desktop을 비롯한 2차원 영상처리에 기반한 분석 기법은, 프로그램 수행 시 자동 경계 추출 과정에서 하나의 큰 블록이 여러 개의 작은 블록들로 나뉘거나, 반대로 여러 개의 작은 블록들이 하나의 큰 블록으로 인식되는 경우가 발생할 수 있다.(Liu & Tran, 1996; Maerz, 1996; Ozkahraman, 2006) 이는 대부분의 2차원 영상처리기법을 이용한 프로그램에서 빈번히 발생하는 문제점으로 알려져 있으며, 따라서 사용자의 입력을 통한 경계 보정 작업에 주의를 기울여야 한다.

### 3.3 평면배치에 대한 파쇄도 분석

그림 3.2와 같이 암석을 서로 다른 형태로 하여 평면적으로 배치한 후 Split Desktop을 이용하여 입도 분포를 분석하였다. 암석의 형상 및 크기를 다르게 하여 서울대학교 순환도로 인근 사면과 강원도 소재 가곡 광산에서 총 39개의 암석을 수집하였다. 우선 수조를 이용하여 각 암석의 부피를 측정하였는데, 측정 결과 암석 블록은  $600\text{cm}^3 \sim 13,000\text{cm}^3$ 의 부피 분포를 보였으며 총 부피는 약  $170,000\text{cm}^3$ 이었다.

Split Desktop의 분석 결과로 제공되는 면적 정보를 확인한 결과, 실제 39개의 블록 정보를 포함하여 Case 1의 경우 83개, Case 2의 경우 100개의 블록 정보가 추출되었다. Split Desktop 프로그램의 해석 결과에는 암석 경계로 이용된 경계선의 면적이 미소한 크기값을 가지며 최종 면적 결과에 포함되므로 실제 블록수보다 더 많은 자료가 추출된 것으로 판단된다. 그림 3.3은 Split Desktop을 이용한 경계 처리 결과를 보여준다.

그림 3.4는 Split Desktop 프로그램에서 제공하는 최종 해석 결과를 보여주며, Case 1과 Case 2에 대하여 전술한 미소 면적 정보가 포함된 분석 자료이다. Case 1의 경우 통과율 20%에서의 직경은 167.24mm, 통과율 50%에서의 직경은 245.31mm, 통과율 80%에서의 직경은 328.80mm, 통과율 100%에서의 직경은 487.65mm로 분석되었다. Case 2의 경우 통과율 20%에서의 직경은 174.02mm, 통과율 50%에서의 직경은 242.44mm, 통과율 80%에서의 직경은 322.83mm, 통과율 100%에서의 직경은 488.64mm로 분석되었다.

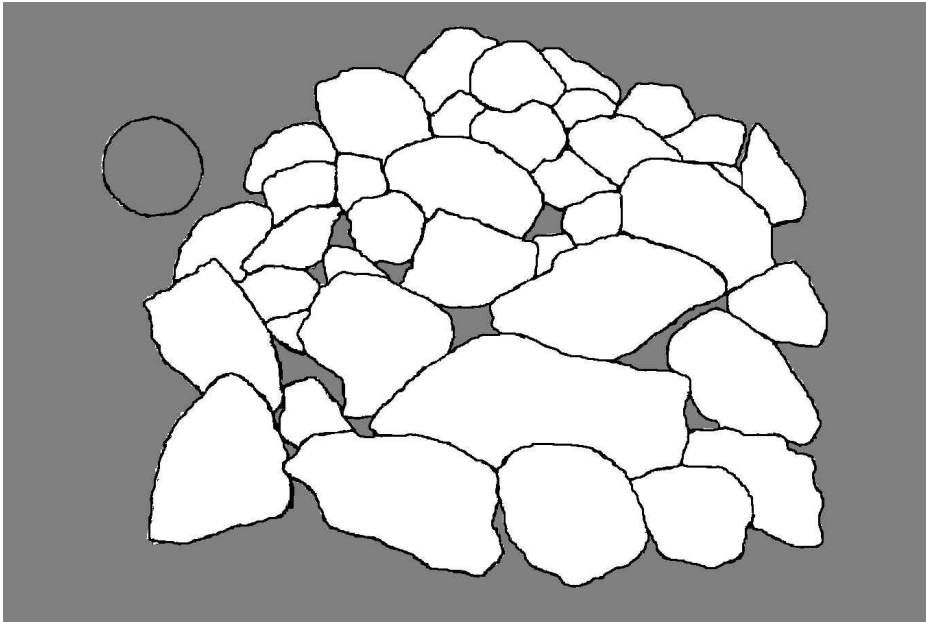


(a) Case 1

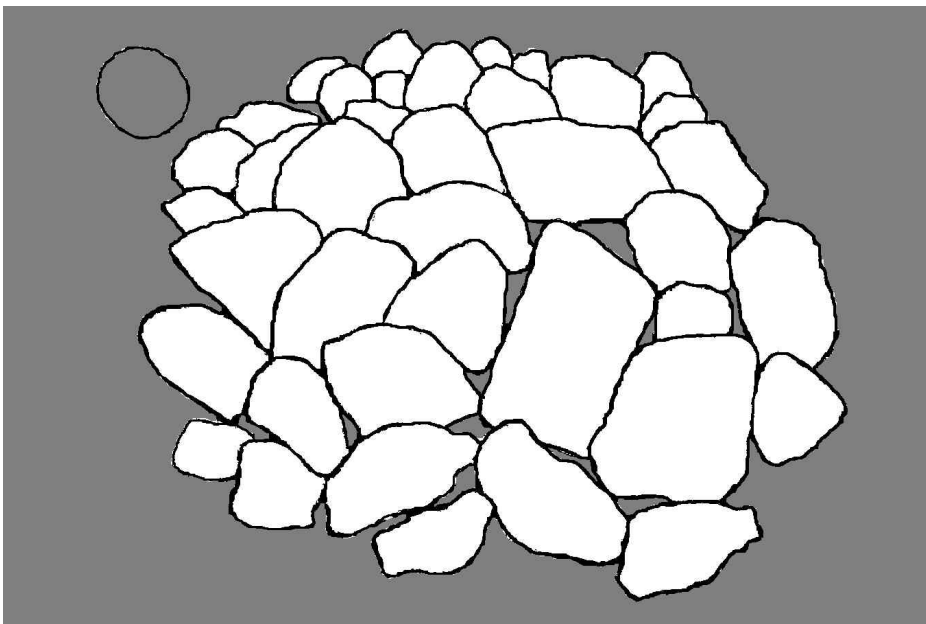


(b) Case 2

Fig. 3.2 Scattered blocks of different arrangements



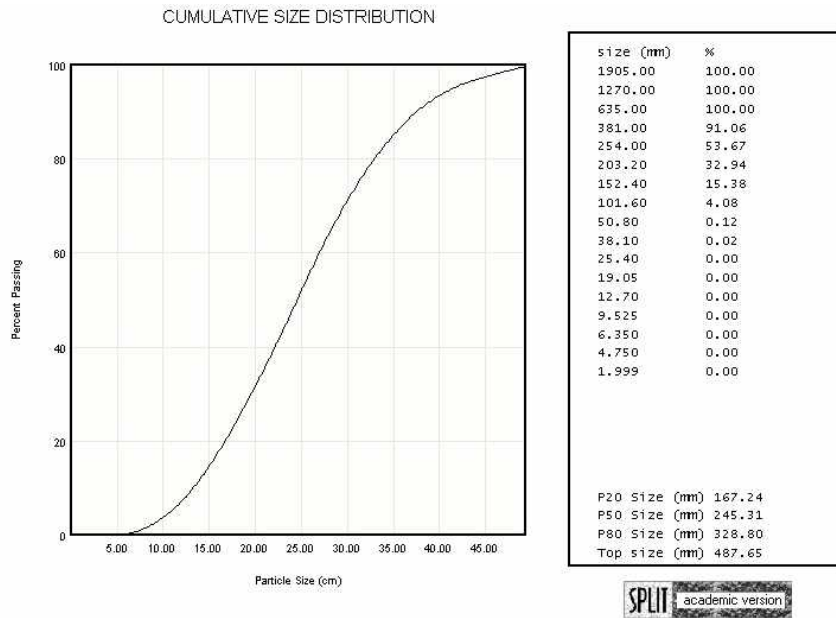
(a) Case 1



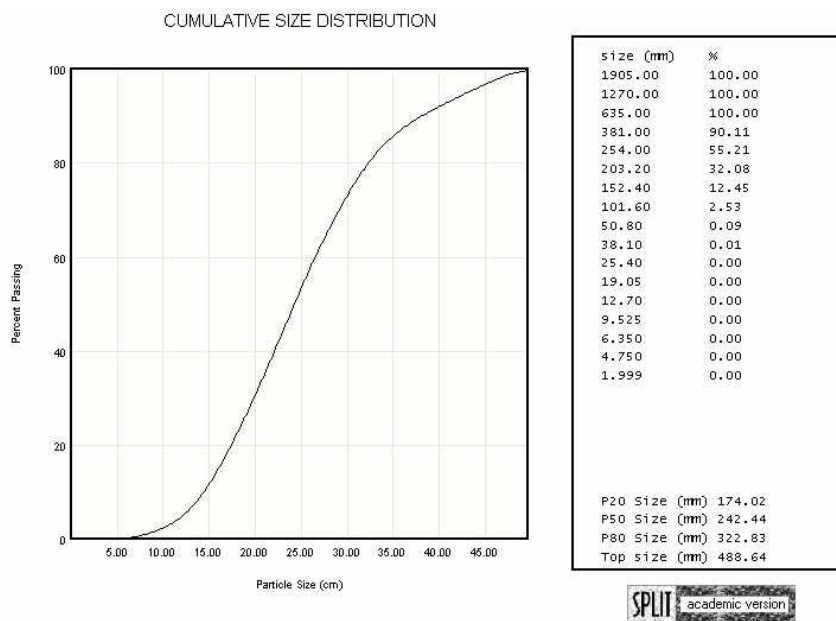
(b) Case 2

Fig. 3.3 Delineation results using Split Desktop for scattered blocks





(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 3.4 Size distributions using Split Desktop for scattered blocks

### 3.4 더미배치에 대한 파쇄도 분석

그림 3.5와 같이 암석의 배치를 달리하여 더미형태로 배치한 후 파쇄도 분석을 수행하였다. 그림 3.6은 Split Desktop을 이용한 경계 처리 결과이며, 그림 3.7은 Split Desktop을 이용하여 분석한 암석의 입도 분포 곡선을 나타낸다. Split Desktop 분석 결과 Case 1의 경우, 통과율 20%에서의 직경은 142.89mm, 통과율 50%에서의 직경은 206.42mm, 통과율 80%에서의 직경은 294.46mm, 통과율 100%에서의 직경은 419.04mm로 분석되었다. Case 2의 경우, 통과율 20%에서의 직경은 141.75mm, 통과율 50%에서의 직경은 208.63mm, 통과율 80%에서의 직경은 289.05mm, 통과율 100%에서의 직경은 437.63mm로 분석되었다.

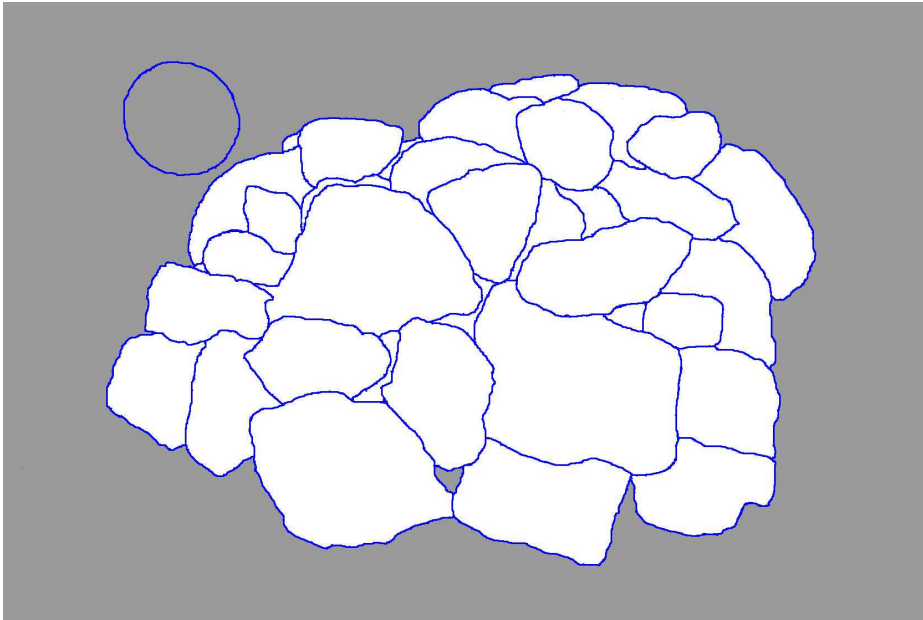


(a) Case 1

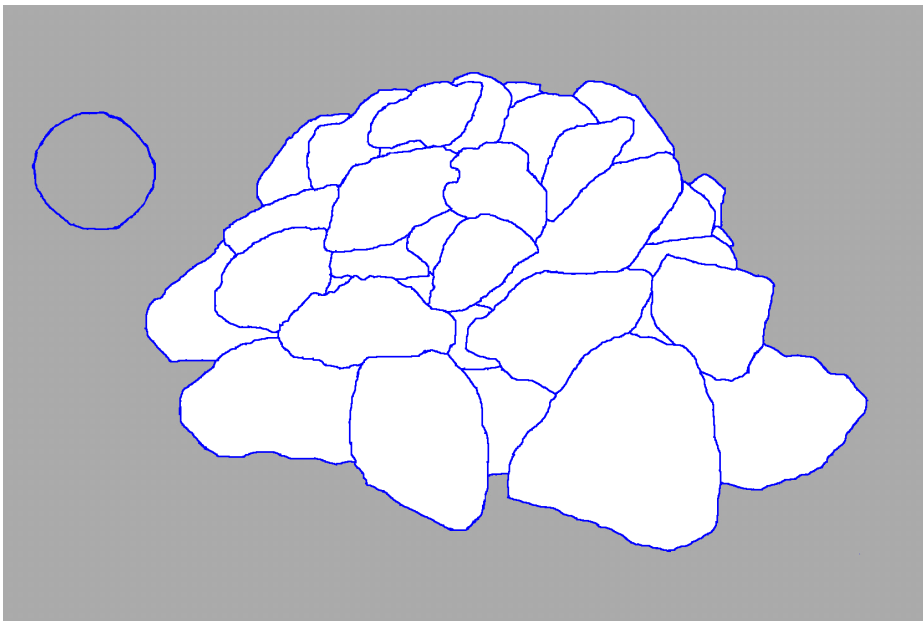


(b) Case 2

Fig. 3.5 Heaped blocks of different arrangements

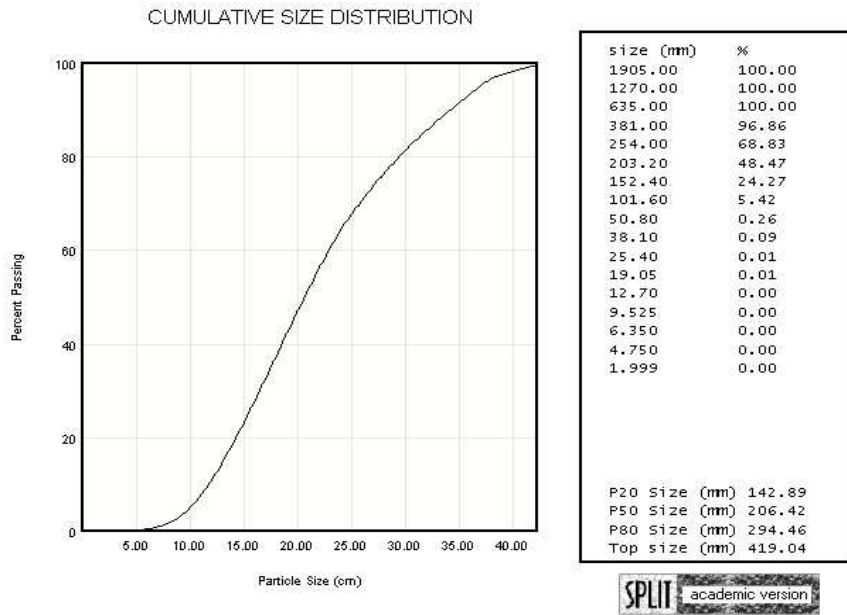


(a) Case 1

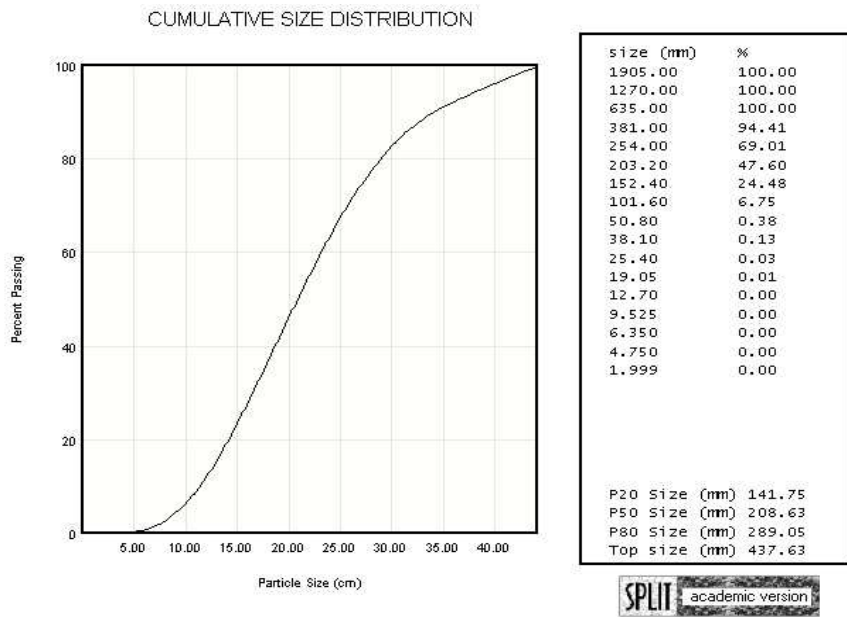


(b) Case 2

Fig. 3.6 Delineation results using Split Desktop for heaped blocks



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 3.7 Size distributions using Split Desktop for heaped blocks

### 3.5 결과 분석

파쇄도 분석을 수행하기에 앞서 이 연구에서는 다음과 같은 기본 가정을 적용하였다. 우선 파쇄암들은 동일 발파면에서 발생한 것으로 판단하며 따라서 모두 같은 단위중량( $\gamma$ )을 갖는 것으로 가정하였다. 이 가정에 기초하여, 직경 분포 곡선의 통과율 정보를 식 (3.1)과 같이 부피의 비를 통하여 계산하였다.

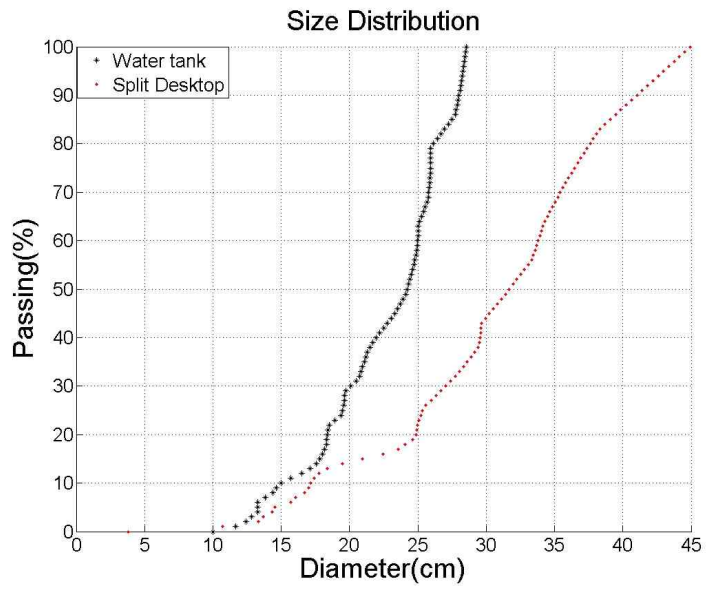
$$m = \gamma V, \quad Passing(\%) = \frac{m_x}{m_{total}} = \frac{\gamma V_x}{\gamma V_{total}} = \frac{V_x}{V_{total}} \times 100 \quad (3.1)$$

( $m_x$  and  $V_x$  are the cumulative mass and volume till  $x$ , respectively)

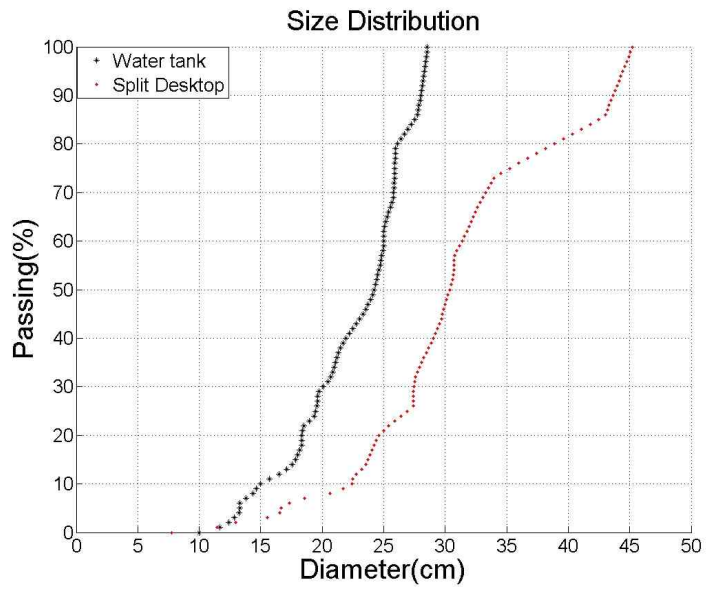
Split Desktop을 이용하여 분석한 결과와 수조를 이용하여 측정한 결과를 비교하기 위하여 다음의 과정을 수행하였다. Split Desktop은 해석 결과로 대상의 면적 정보를 제공하는데, Split Desktop을 이용한 분석 시 암석은 완전한 원의 형태를 가지는 것으로 가정하였고, 식 (3.2)과 같이 원의 면적 공식을 이용하여 파쇄암의 등가 직경을 계산하였다. 여기서,  $D_{equi}$ 와  $A$ 는 각각 등가 직경과 면적을 나타낸다.

$$D_{equi} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (3.2)$$

이후, 암석은 공간상에서 완전한 구체의 형태를 가지는 것으로 가정하여, 식 (3.2)에서 얻은  $D_{equi}$ 를 구체의 부피 공식에 적용하여 부피를 계산하였고, 부피 결과를 식 (3.1)에 적용하여 통과율 정보를 계산하였다.

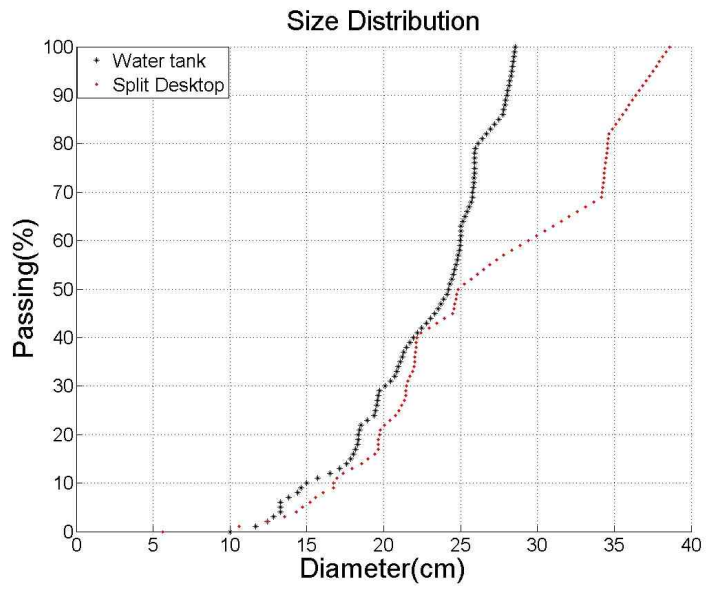


(a) Case 1

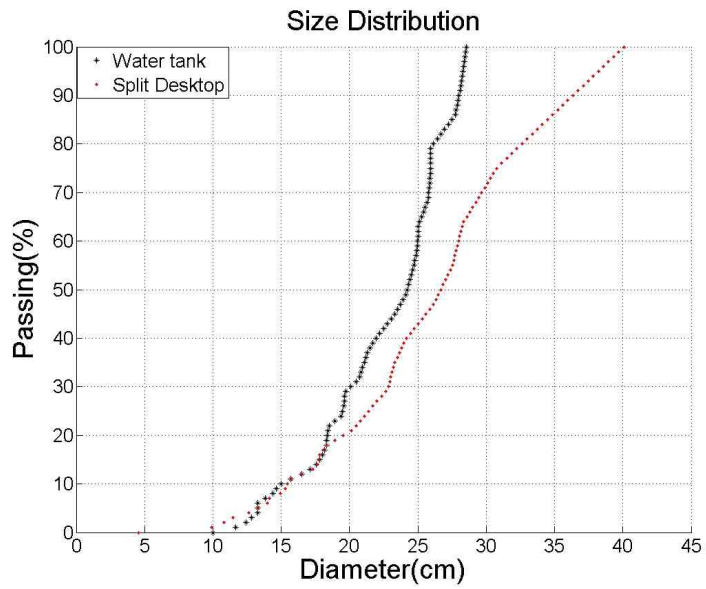


(b) Case 2

Fig. 3.8 Size distributions from the water tank measurement and the Split Desktop analysis for scattered blocks



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 3.9 Size distributions from the water tank measurement and the Split Desktop analysis for heaped blocks



Split Desktop을 이용하여 분석된 면적 자료 중 전술한 미소 면적 정보를 제외한 블록 정보만을 이용하여 암석의 입도를 재분석한 후, 수조를 이용하여 측정된 결과와 비교하였다. 그림 3.8과 3.9는 각각 평면배치와 더미배치에 대하여, Split Desktop과 수조를 이용하여 암석의 입도를 분석 및 비교한 결과를 나타낸다. Split Desktop은 통과율 50%에서의 파쇄 직경을 나타내는 평균 파쇄 직경을 약 50% 과대평가하는 것으로 보고되었는데(Liu & Tran, 1996), 이 연구에서의 분석 결과, Split Desktop을 이용한 해석 결과는, 수조를 이용한 측정 결과와 비교하여 직경이 커질수록 그 차이가 커짐을 확인할 수 있었다. 수집된 암석 중에 평면적으로 넓은 형상을 가진 암석들이 있었는데, 이러한 암석의 경우 평면적 정보를 기준으로 계산된 등가 직경 정보가 3차원적으로 이용됨으로써 부피가 과대평가되는 경향을 보여 직경이 커질수록 차이가 커지는 것으로 판단된다.

표 3.3과 3.4는 각각 평면배치와 더미배치에 대하여, 최대 직경 차이, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{50}$ ) 차이, 전 구간에 대한 평균 직경 차이를 분석한 결과를 나타낸다. 평면배치 Case 1에 대하여, 수조를 이용하여 측정된 결과와 Split Desktop에 의한 결과 차이는 최대 직경 차이 16.37cm로 약 57%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경 차이는 7.46cm로 약 31%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 8.12cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 34%의 오차를 보였다. Case 2의 경우, 최대 직경 차이는 16.68cm로 약 58%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경 차이는 6.14cm로 약 25%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 8.43cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 36%의 오차를 보였다.

더미배치 Case 1에 대하여, 수조를 이용하여 측정된 결과와 Split Desktop에 의한 결과와의 최대 직경 차이는 10.04cm로 약 35%, 통과율

50%에서의 파쇄 직경 차이는 0.63cm로 약 3%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 4.08cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 17%의 오차를 보였다. Case 2의 경우, 최대 직경 차이는 11.52cm로 약 40%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경 차이는 2.45cm로 약 10%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 3.67cm로, 백분율로 나타내었을 때 약 15%의 오차를 보였다.

Table 3.3 Errors between the water tank measurement and the Split Desktop analysis for scattered blocks

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )		Error at $D_{50}$ ( cm / % )		Mean Error ( cm / % )	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
50	-	-	7.46/31	6.14/25	8.12/34	8.43/36
100	16.37/57	16.68/58	-	-		

Table 3.4 Errors between the water tank measurement and the Split Desktop analysis for heaped blocks

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )		Error at $D_{50}$ ( cm / % )		Mean Error ( cm / % )	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
50	-	-	0.63/3	2.45/10	4.08/17	3.67/15
100	10.04/35	11.52/40	-	-		

## 4. 3차원 블록 분할 자동화 기법을 이용한 파쇄도 분석 기법 개발

### 4.1 입체사진측량기법을 이용한 3차원 파쇄도 분석

#### 4.1.1 3차원 정보 복원

PhotoModeler Scanner를 이용하여 수집한 암석의 3차원 정보를 분석하였다. PhotoModeler Scanner는 3차원 모델링 전문 프로그램으로서, 발파 파쇄도 분석 전문 프로그램은 아니지만 대상물의 3차원 정보를 활용할 수 있는 장점을 가진다. 3차원 모델링을 위하여 대상에 대한 스테레오 영상을 취득하게 되는데, 이 때 스케일링 및 공간 위치 결정 지표로 이용되는 타겟을 대상물 주변에 배치하여 함께 영상을 취득한다. 영상 분석을 위하여 우선, 입력된 영상에 대하여 카메라 및 렌즈의 왜곡 보정 작업을 수행한다. 상기 타겟의 정보를 이용하여 입력 영상 사이의 상대적 공간 위치를 결정(referencing and orientation)한 후, 스케일링 작업을 수행한다. 이후 관심 영역에 대한 모델링을 통해 대상물에 대한 3차원 결과를 얻을 수 있다. 이 연구에서는 대상물의 부피 및 3차원 점군(point cloud) 자료를 추출하였다. 그림 4.1은 PhotoModeler Scanner의 프로그램 처리 순서를 나타낸다.

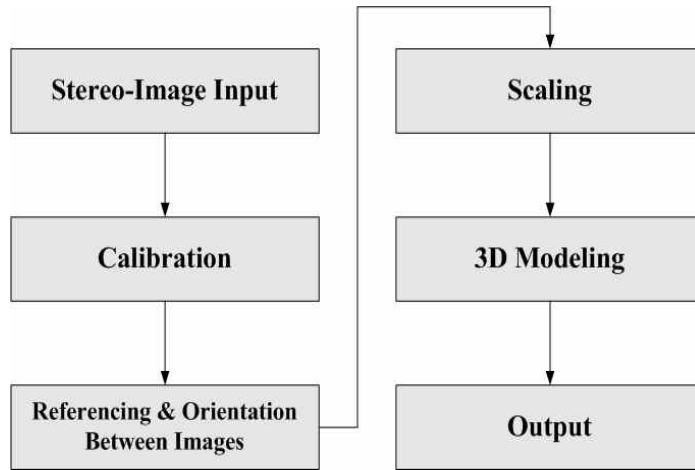


Fig. 4.1 Flowchart in PhotoModeler Scanner

#### 4.1.2 평면배치에 대한 3차원 파쇄도 분석

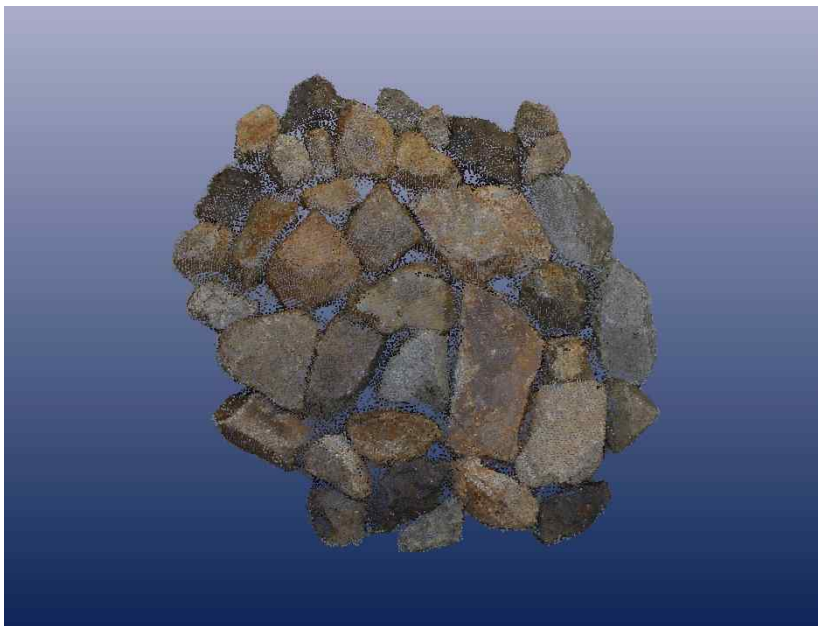
그림 3.2의 평면배치에 대하여 입체사진측량기법을 이용한 3차원 파쇄도 분석을 수행하였다. 3차원 분석을 위하여, PhotoModeler Scanner를 이용하여 각 암석 블록을 개별 모델링하였다. PhotoModeler Scanner에서는 대상의 부피 정보를 얻을 수 있는데, 이에 대하여 암석은 완전한 구체의 형태를 가지는 것으로 가정하여, 식 (4.1)과 같이 구체의 부피 공식을 이용하여 파쇄암의 등가 직경을 계산하였다. 여기서,  $D_{equi}$ 와  $V$ 는 각각 등가 직경과 부피를 나타낸다.

$$D_{equi} = 2 \times \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (4.1)$$

이후, 상기 부피 정보를 식 (3.1)에 적용하여 통과율 정보를 계산하고, 이로부터 최종 통과율-직경 정보를 분석하였다.

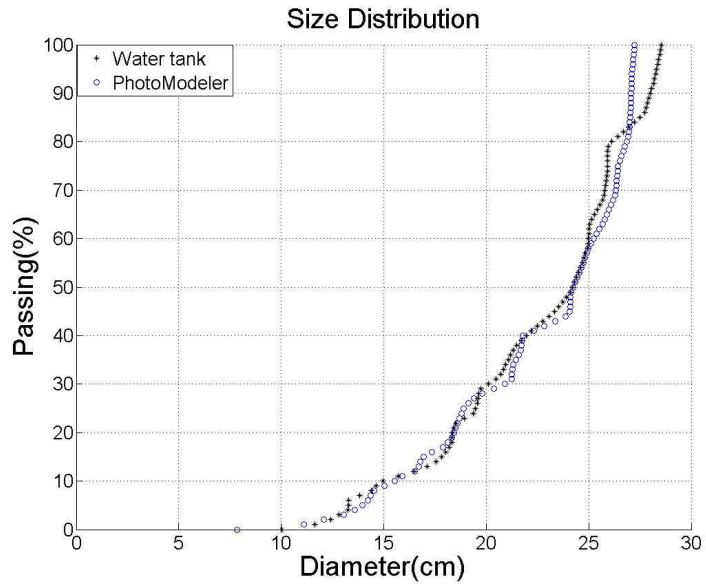


(a) Case 1

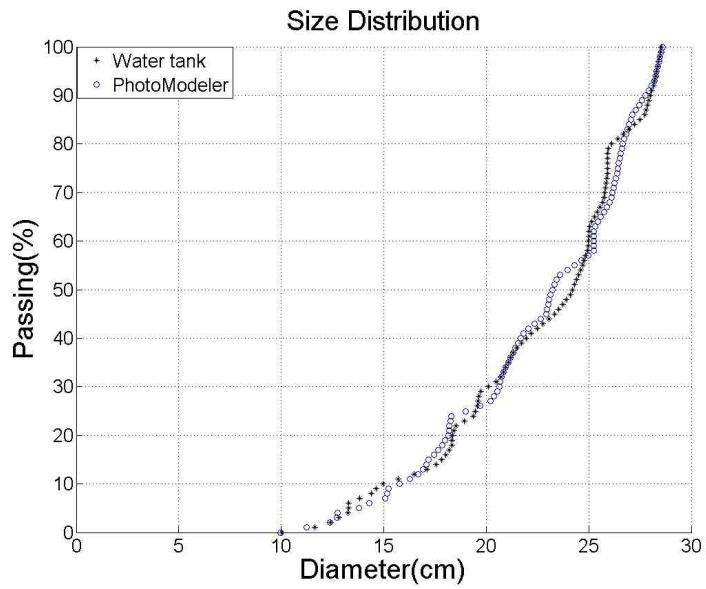


(b) Case 2

Fig. 4.2 Modeling images using a PhotoModeler Scanner for scattered blocks



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 4.3 Size distributions from the water tank measurement and the PhotoModeler Scanner analysis for scattered blocks

그림 4.2는 평면배치에 대하여 PhotoModeler Scanner를 이용하여 전체 파쇄암을 모델링한 결과이며, 그림 4.3은 수조를 이용하여 측정된 결과와 입체사진측량기법(PhotoModeler Scanner)을 이용하여 분석한 암석의 입도를 비교한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 수조를 이용하여 측정된 부피에 대한 암석의 입도 분포와 입체사진측량기법을 이용하여 분석한 암석의 입도 분포는 매우 유사한 결과를 보였다. 따라서, 입체사진측량기법을 이용하여 파쇄암의 정보를 개별 분석한 후, 이를 통하여 파쇄도를 분석한다면 실제와 유사한 수준의 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

표 4.1은 평면배치에 대하여, 최대 직경 차이, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{50}$ ) 차이, 전 구간에 대한 평균 직경 차이를 분석한 결과를 나타낸다. Case 1의 경우, 수조를 이용하여 측정된 결과와 입체사진측량기법에 의한 결과 차이는 최대 직경 차이 2.18cm로 약 22%의 오차를 보였다. 다만, 이때의 최대 직경 차이는 통과율 0%에서의 차이이며, 통과율 0%에서의 자료는 선형 외삽 수행에 의한 결과임을 고려할 때, 통과율 0%에서의 자료를 제외한 나머지 자료들 중 최대 직경 차이는 1.31cm로, 해당 통과율에서 수조를 이용하여 측정된 결과와 비교하여 약 5%의 오차를 보였다. 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{50}$ ) 차이는 0.04cm로 1% 내의 오차를 보였고, 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 0.51cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 3%의 오차를 보였다. Case 2의 경우, 최대 직경 차이는 1.23cm로 약 9%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{50}$ ) 차이는 0.98cm로 약 4%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 0.39cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 2%의 오차를 보였다.

Table 4.1 Errors between the water tank measurement and the PhotoModeler Scanner analysis for scattered blocks

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )		Error at $D_{50}$ ( cm / % )		Mean Error ( cm / % )	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
0	2.18/22	-	-	-	0.51/3	0.39/2
7	-	1.23/9	-	-		
50	-	-	0.04/<1	0.98/4		
100	1.31/5	-	-	-		

#### 4.1.3 통계적 파쇄도 분석 과정

발파를 통해 발생하는 파쇄암들의 입도 분포를 정확히 분석하기 위해서는 개별 블록에 대하여 전수 조사하는 것이 가장 좋은 방법이다. 그러나 현장 상황을 고려할 때, 발파로 인해 발생하는 수백, 수천 개 이상의 파쇄암들을 모두 조사하는 것은 현실적으로 불가능하므로, 일반적으로 샘플링을 통한 통계 분석이 이루어지고 있다. 또한 발파 현장에서 발파 후 발생하는 파쇄암들은 더미 형태로 쌓여 더미 내부에 존재하는 파쇄암들에 대한 정보를 확인하기 어려우므로, 더미 전체에 대하여 파쇄도를 분석하기 위해서는 더미 내부에 존재하는 블록들에 대한 추정이 필요하다. 이러한 파쇄 더미에서는 더미 외측 블록들의 정보가 가장 쉽게 그리고 직관적으로 확인할 수 있는 정보이므로, 이 연구에서는 더미 외측 블록들의 정보를 기반으로 한 통계적 추정(Surface Based Estimation, SBE)을 수행하였다.



우선 입체사진측량기법을 이용하여 더미 외측 블록들을 개별적으로 모델링하고, 여기서 얻은 결과를 이용하여 각 파쇄암들의 부피 및 직경 정보를 분석한다. 이후 더미 외측 블록들의 직경에 대한 빈도 분석 (frequency count)을 수행한 후, 빈도 분석을 통해 얻은 더미 외측 블록의 직경 분포와 가장 유사하다고 판단되는 분포 함수를 결정한다. 더미 외측 블록들의 정보를 이용하면, 이 분포 함수에 대하여 각 직경(가로축)에 대한 누적 발생 확률(세로축)을 나타내는 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 생각할 수 있는데, 이 분포 함수로부터 임의의 발생 확률에 대한 직경 정보를 역함수를 통하여 계산하였다. 마지막으로, 파쇄도 분석 방법에 따른 결과의 비교를 위하여 결과 자료를 통과율 간격이 1이 되도록 재구성하였다. 그림 4.4는 전체적인 분석 과정을 나타낸다.

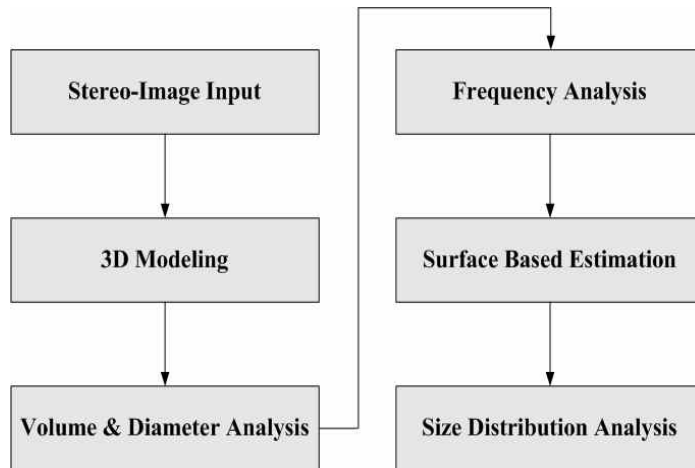


Fig. 4.4 Procedure for the Surface Based Estimation, SBE

#### 4.1.4 입력 자료 개선

PhotoModeler Scanner를 이용한 파쇄암의 모델링 자료 획득에 있어, 2 방향 이상의 자료로 모델링되지 않거나 다른 블록들 틈 사이로 일부만 확인되는 경우에는, 해당 블록에 대한 실제 정보를 확인할 수 없으므로 입력 자료 선정 단계에서 오차가 포함될 수 있으며, 통계 추정의 상/하한이 설정되지 않은 경우, 그림 4.5와 같이 추정 결과의 왜곡이 큰 경우가 발생함을 확인할 수 있었다. 따라서 PhotoModeler Scanner(PMS)를 이용한 파쇄암 모델링 시 암석면이 2 방향 이상에서 확인이 되지 않거나 다른 블록들 사이로 실제 파쇄암보다 매우 작은 부분만 모델링 된다고 판단되는 경우에는, 해당 자료를 통계 추정을 위한 입력 자료에서 제외하였다. 또한 직경 정보를 추정함에 있어 통과율이 낮은 곳과 높은 곳에서의 자료가 무분별하게 추출되는 것을 방지하기 위하여, 더미 외측으로 확인된 최소 직경과 최대 직경을 통계 추정의 하한값 및 상한값으로 설정한 후 자료를 추정하였다.

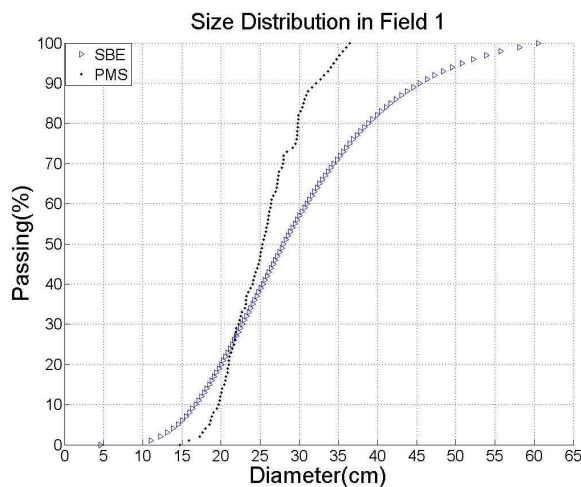


Fig. 4.5 Distorted estimation result using improper input parameters

마지막으로, 파쇄 더미에서는 암석 블록이 서로 다른 암석 블록들 사이에 존재하여 그림 4.6과 같이 외부에서 확인이 되지 않는 부분이 존재하게 되며, 따라서 입체사진측량기법 적용 시에 해당 부분만큼의 오차가 발생하게 된다(Han & Song, 2014). 또한 더미 외측 블록들의 정보만을 이용하여 파쇄도를 분석하는 경우에는 더미 외측 블록들에 대한 분석 결과가 되므로, 이 결과가 더미 전체의 정보를 나타낸다고 할 수 없다.

Maerz 등(1998)은 파쇄 더미에서 2차원 기법을 이용한 분석 시 결과가 과소평가되는 것을 확인하였고, Rosin-Rammler 입도 분포 함수를 통해 결과를 보정하는 연구를 수행하였다. 식 (4.2)의 Rosin-Rammler 입도 분포 함수는, 통과율 63.2%에서의 직경 크기를 나타내는  $x_c$ 와 입도 분포 곡선의 분산도를 나타내는  $n$ 의 두 매개변수만을 이용하여 임의 직경에서의 통과율  $F(x)$ 을 예측하는 함수이다. 그러나 이 분포 함수는 큰 직경에 대한 분포 예측에 문제점을 갖는 것으로 보고되었으며(Rizk & Lefebvre, 1985), 측정이 어려운 정도의 작은 직경을 갖는 물체들에 대하여 적합도가 우수한 것으로 알려져 있다(Van Breugel, 1995; 이상용, 1996).

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n\right] \quad (4.2)$$

서론에서 언급한 바와 같이, 이 연구에서는 경제적으로 유의미한 크기의 파쇄암에 대하여, 전체 더미의 정보와 더미 외측 블록 정보 사이의 오차를 평가하고자 하였다. 이 오차량을 평가하기 위하여 이 연구에서는 실내 파쇄도 분석에 이용한 암석 및 현장 3곳에서 수집한 암석들에 대하여 직경의 크기를 분석하였다. 우선 실내 39개 암석의 경우 평균 직경은

18.83cm로 분석되었고, 더미배치에 대한 파쇄도 분석을 통하여 확인된 외측 블록들의 직경의 경우 Case 1의 직경 평균은 16.26cm, Case 2의 직경 평균은 16.79cm로 분석되었다. 현장 파쇄 더미의 경우, 첫 번째 동해 현장 100개 암석의 평균 직경은 24.65cm, 외측 블록의 평균 직경은 21.06cm, 두 번째 동해 현장 101개 암석의 평균 직경은 26.40cm, 외측 블록의 평균 직경은 23.11cm로 분석되었으며, 삼척 현장 103개 암석의 평균 직경은 22.95cm, 외측 블록의 평균 직경은 17.60cm로 분석되었다. 오차율은 전체 자료에 대한 평균 직경과 외측 블록의 평균 직경의 비(ratio)를 통하여 산정하였으며, 분석된 오차율을 표 4.2에 나타내었다. 총 5회에 대한 평균 오차는 14.96%로 분석되었다. 따라서 통계 추정을 수행함에 있어 더미 외측 블록으로 분석된 자료에 15%의 보정을 한 후 분석을 수행하였다. 한정훈과 송재준의 기존 연구(2011)에서는, 파쇄암 전체에 대한 직경 분석 시 입체사진측량기법을 이용하여 더미 전체를 모델링한 후 이에 대한 총 부피를 분석하고, 다시 더미 외측 블록들을 개별 모델링하여 더미 외측 블록의 총 부피를 계산하였다. 통계 추정에 앞서, 더미 내부의 암석 사이의 공간은 모두 다른 암석으로 채워져 있는 것으로 가정하고 전체 더미와 외측 블록 부피의 차이를 계산하였다. 이러한 가정을 통하여, 두 부피의 차이, 즉 더미 내부에 해당 부피만큼의 블록이 존재하는 것으로 가정하여 통계 추정을 수행하였으며, 통계 추정 결과와 입체사진측량기법을 이용하여 분석한 더미 외측 블록의 직경 정보를 더하여 전체 직경 분포를 분석하였다. 그러나 이 경우는 상기한 오차가 포함된 자료이므로 이 연구에서는 외측 블록에 대한 보정을 수행한 후 이 정보를 바탕으로 추정된 통계 자료만을 이용하여 전체 직경 분포를 분석하였다.

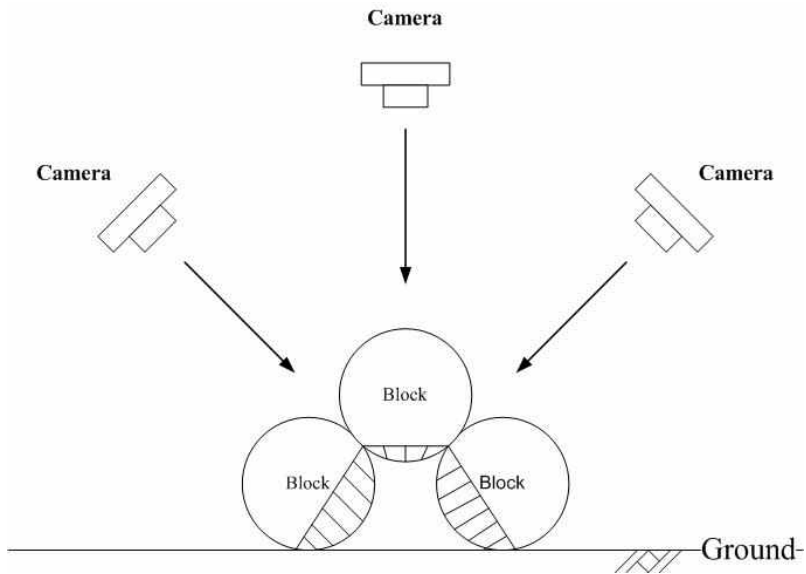


Fig. 4.6 Possible source of error of heaped blocks (Han & Song, 2014)

Table 4.2 Errors of surface blocks in heaped blocks

(After Han & Song, 2014)

		Mean Diameter (cm)	Error Ratio (%)	
Laboratory experiments	Entire	18.83	-	
	Surface in Case 1	16.26	13.65	
	Surface in Case 2	16.79	10.83	
Field experiments	Donghae 1	Entire	24.65	-
		Surface	21.06	14.56
	Donghae 2	Entire	26.40	-
		Surface	23.11	12.46
	Samchuck	Entire	22.95	-
		Surface	17.60	23.31
Mean Error Ratio (%)			14.96	

#### 4.1.5 더미배치에 대한 통계적 파쇄도 분석

그림 3.5의 더미배치에 대하여 통계적 파쇄도 분석을 수행하였다. 그림 4.7은 PhotoModeler Scanner를 이용하여 더미 전체를 모델링한 결과이다. 입체사진측량기법을 이용한 해석의 경우, 4.1.3절의 내용에 따라 암석의 입도 분포를 추정하였다. 더미 외측 블록에 대한 빈도 분석을 수행한 결과, 그림 4.8과 같이 두 경우 모두 대수정규분포를 따르는 것으로 분석되었다. 식 (4.3)은 평균  $\mu$ , 표준편차  $\sigma$ 를 갖는 대수정규분포의 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)를 나타내며, 식 (4.4)는 대수정규분포의 누적확률분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 나타낸다. 식 (4.5)는 누적확률분포에 대한 역함수를 나타내며, 식 (4.3), (4.4), (4.5)에서 보듯이 대수정규분포 함수는 평균  $\mu$ 와 표준편차  $\sigma$ 를 입력 변수로 하는 분포이다. 따라서 파쇄암의 직경 분포 추정에 있어, 더미 외측 블록에 대한 평균 및 표준 편차를 그 입력 자료로 하여 식 (4.5)와 같이 역함수를 통하여 내부 블록의 직경 정보를 추정하였다.

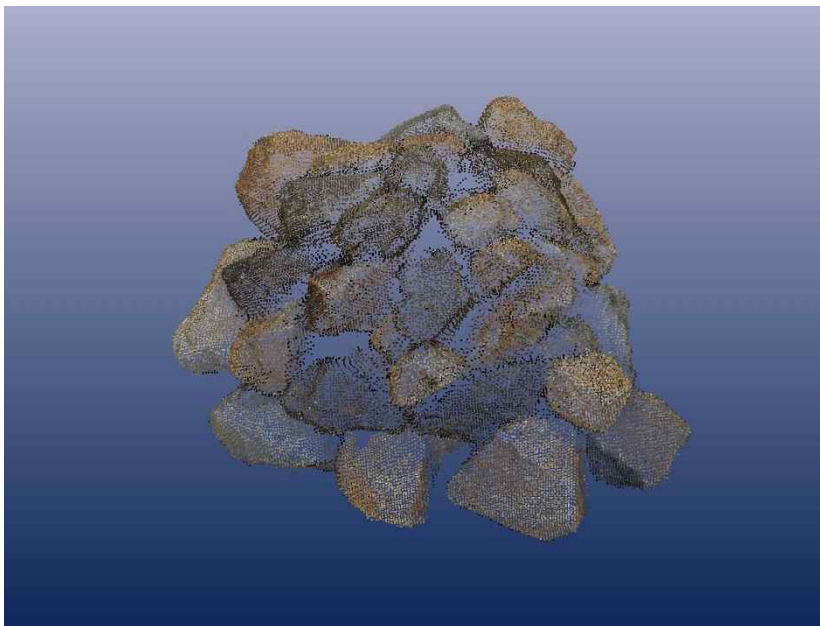
$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0 \quad (4.3)$$

$$F(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{\ln x - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}{t} dt \quad (4.4)$$

$$x = F^{-1}(p|\mu, \sigma) \quad (4.5)$$

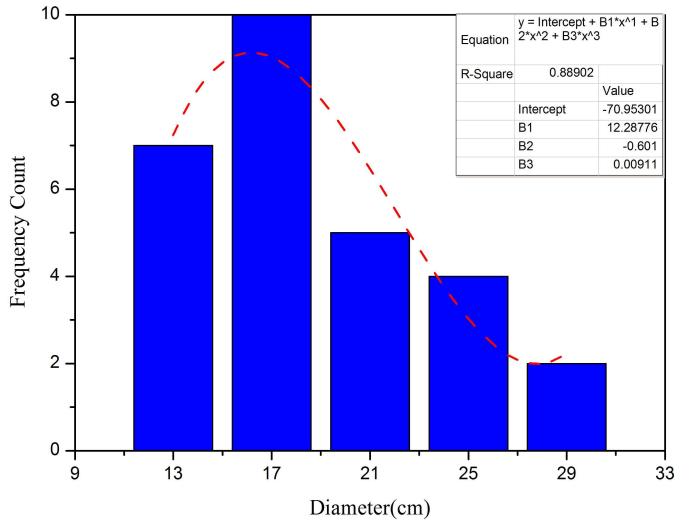


(a) Case 1

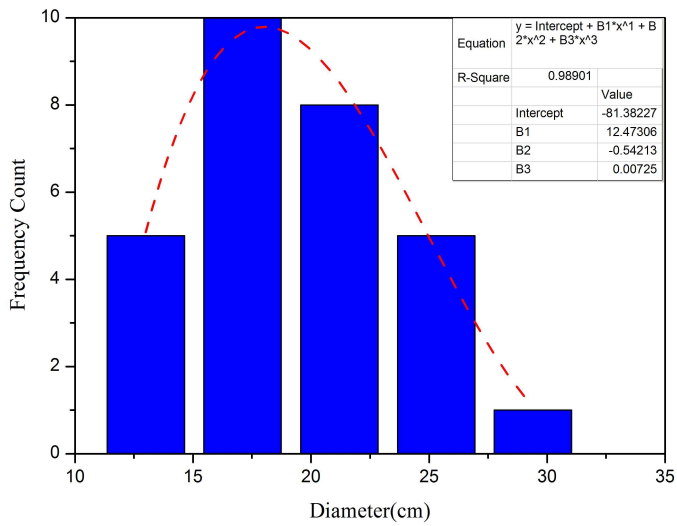


(b) Case 2

Fig. 4.7 Modeling images using a PhotoModeler Scanner for heaped blocks



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 4.8 Frequency count of surface blocks analyzed with a PhotoModeler Scanner for heaped blocks



단, 4.1.4절에서 언급한 바와 같이, 통과율이 낮은 곳과 높은 곳에서의 자료가 무분별하게 추출되는 것을 방지하기 위하여 통계 추정의 상/하한을 설정하였으며, 이를 고려한 자료의 추정은 다음의 식과 같다. 식 (4.6)은 직경  $x$ 의 상/하한값이 각각  $a$ 와  $b$ 인 정규분포의 절단확률밀도 함수를 나타내며, 식 (4.7)은 이에 대한 절단누적확률밀도함수(Truncated Cumulative Distribution Function, TCDF)를 나타낸다.

$$f_T(x) = \frac{f(x)}{\int_a^b f(x)dx}, \quad a \leq x \leq b \quad (4.6)$$

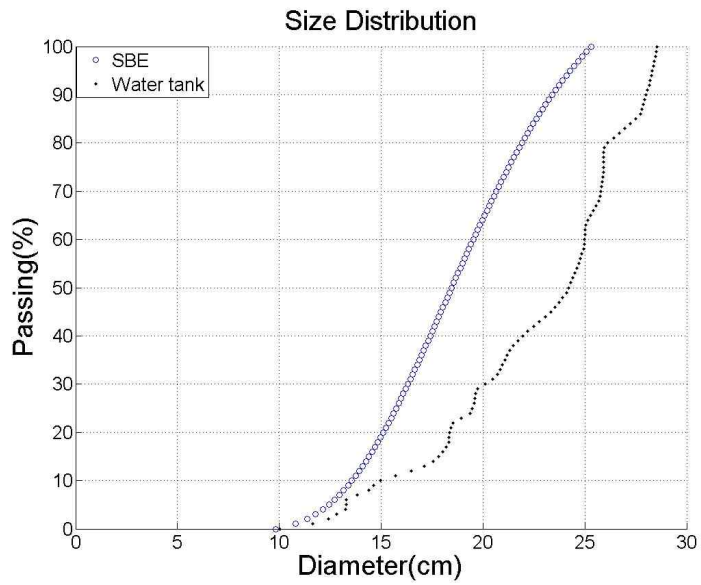
$$F_T(x) = \int_a^x f_T(t)dt = \frac{\int_a^x f(t)dt}{\int_a^b f(t)dt} = \frac{F(x) - F(a)}{F(b) - F(a)} \quad (4.7)$$

PhotoModeler Scanner를 이용한 분석 결과에, 4.1.4절에서 언급한 더미 배치 형태에 따른 오차율 15% 만큼 직경 정보를 보정하였다. 분석 결과, Case 1의 경우 더미 외측 블록의 최소 직경은 11.35cm, 최대 직경은 29.12cm로 분석되었으며, 평균 직경은 18.70cm, 표준편차는 5.08cm로 분석되었다. Case 2의 경우 더미 외측 블록의 최소 직경은 11.64cm, 최대 직경은 29.24cm로 분석되었으며, 평균 직경은 19.30cm, 표준편차는 4.31cm로 분석되었다. 이들 자료를 토대로 파쇄 더미에 대한 입도 분포를 통계적으로 추정하였으며, 그림 4.9와 4.10은 수조를 이용하여 측정한 자료와 PhotoModeler Scanner를 이용하여 분석한 입도 분포를 나타낸다. 그림 4.9는 PhotoModeler Scanner를 이용하여 더미 외측 직경 정보를 분석한 후,

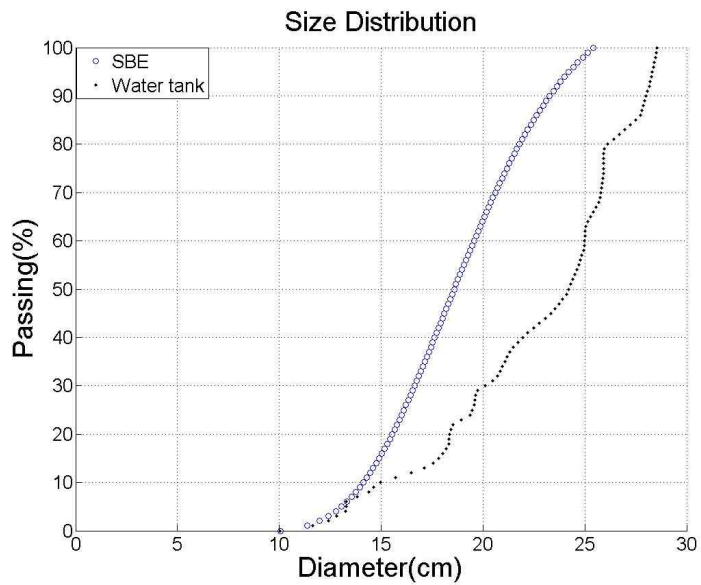
보정을 가하지 않은 직경 정보를 기초로 통계적으로 추정된 결과이며, 그림 4.10은 4.1.4절의 결과를 토대로 더미 외측 직경에 15%의 보정을 수행 후, 식 (4.7)과 같이 상/하한을 설정하여 통계 추정을 수행한 자료이다. 해석 결과에서 보듯이, 그림 4.10과 같이 더미 외측 직경에 대한 보정 후 상/하한을 설정하여 추정된 결과가 그림 4.9와 같이 직경 정보를 보정하지 않은 결과보다, 수조를 이용하여 측정한 결과와 비교하여 최대/최소 직경이 유사한 수준에서 향상된 결과를 제공함을 확인할 수 있었다. 표 4.3은 그림 4.10의 결과 직경을 비교한 자료이다. Case 1의 경우, 수조를 이용하여 측정한 결과와 더미 외측 블록에 기반한 추정(Surface Based Estimation, SBE) 결과와의 최대 직경 차이는 3.01cm로 약 12%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{50}$ ) 차이는 2.99cm로 약 12%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 1.55cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 7%의 오차를 보였다. Case 2의 경우, 수조를 이용하여 측정한 결과와 SBE 결과와의 최대 직경 차이는 2.85cm로 약 12%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경 차이는 2.85cm로 약 12%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 1.52cm로, 백분율로 나타내었을 때 약 7%의 오차를 보였다.

Table 4.3 Errors between the water tank measurement and the SBE for heaped blocks

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )		Error at $D_{50}$ ( cm / % )		Mean Error ( cm / % )	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
49	3.01/12	2.85/12	-	-	1.55/7	1.52/7
50	-	-	2.99/12	2.85/12		

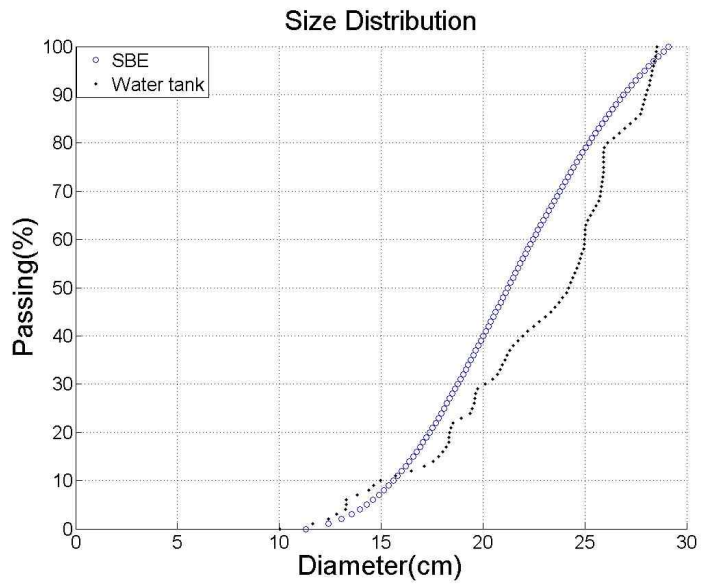


(a) Case 1

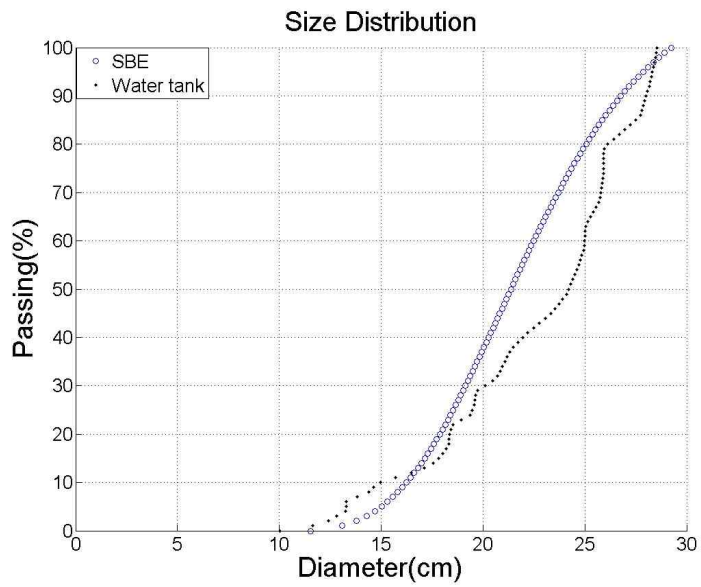


(b) Case 2

Fig. 4.9 Size distributions from the SBE and the water tank measurement without the improvement of input parameters for heaped blocks



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 4.10 Size distributions from the SBE and the water tank measurement with the improvement of input parameters for heaped blocks

밭과 현장의 파쇄암에 대하여 입체사진측량기법을 이용한 통계적 파쇄도 분석을 수행하였다. 강원도 소재 쌍용자원개발 동해사업소 내 벤치밭과면 두 곳(Field 1, 2) 및 삼척사업소(Field 3) 밭과 현장에서 그림 4.11과 같이 각각 총 100개와 101개, 103개의 파쇄암에 대하여 입도 분포를 분석하였다. 그림 4.12는 PhotoModeler Scanner를 이용하여 전체 더미를 모델링한 결과이다. 4.1.2 절의 결과에서 보듯이, 입체사진측량기법을 이용하여 암석 블록을 개별적으로 모델링하고 그 정보를 분석하는 경우, 수조를 이용하여 측정한 결과와 매우 유사한 수준의 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 이 연구에서는 PhotoModeler Scanner를 이용하여 현장 파쇄암의 개별 정보를 분석하였다. 우선 각 파쇄암에 대하여 영상을 취득하고 이를 PhotoModeler Scanner를 이용하여 모델링 및 직경 정보를 분석하였다. 그림 4.13은 개별 파쇄암에 대한 모델링 예시이다. PhotoModeler Scanner를 이용한 분석 결과, Field 1 파쇄암의 부피 분포는 약  $1,500\text{cm}^3 \sim 70,400\text{cm}^3$ , 총 부피는 약  $1,020,000\text{cm}^3$ 로 분석되었으며, Field 2 파쇄암의 부피 분포는 약  $1,500\text{cm}^3 \sim 42,700\text{cm}^3$ , 총 부피는 약  $1,100,400\text{cm}^3$ 로 분석되었다. Field 3 파쇄암의 부피 분포는 약  $1,700\text{cm}^3 \sim 25,300\text{cm}^3$ , 총 부피는 약  $730,000\text{cm}^3$ 로 분석되었다.



(a) Field 1



(b) Field 2

Fig. 4.11 Muckpile in the field





(c) Field 3

Fig. 4.11 Muckpile in the field (Continued)

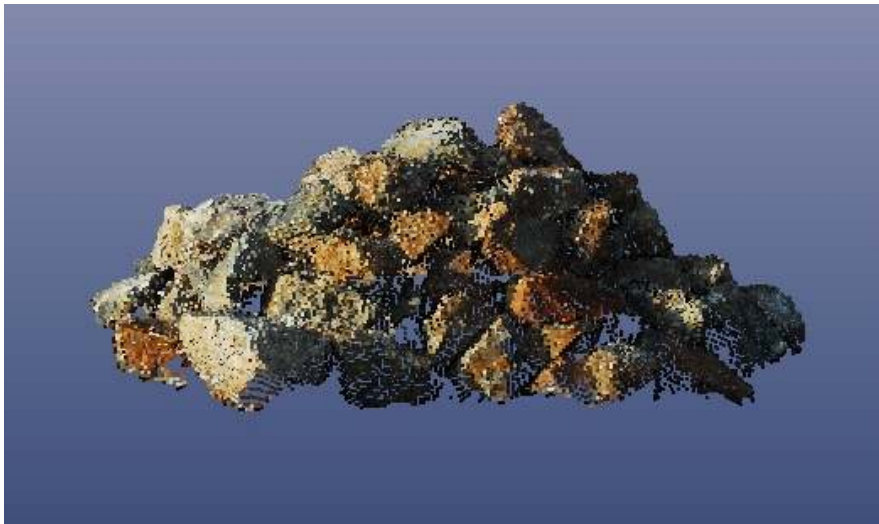


(a) Field 1

Fig. 4.12 Modeling images using a PhotoModeler Scanner for a muckpile in the field



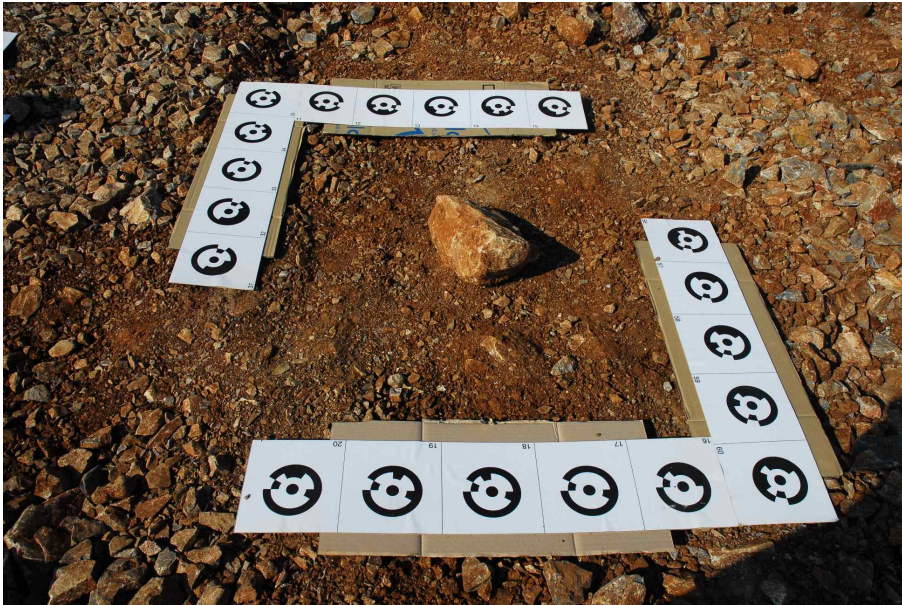
(b) Field 2



(c) Field 3

Fig. 4.12 Modeling images using a PhotoModeler Scanner for a muckpile in the field (Continued)





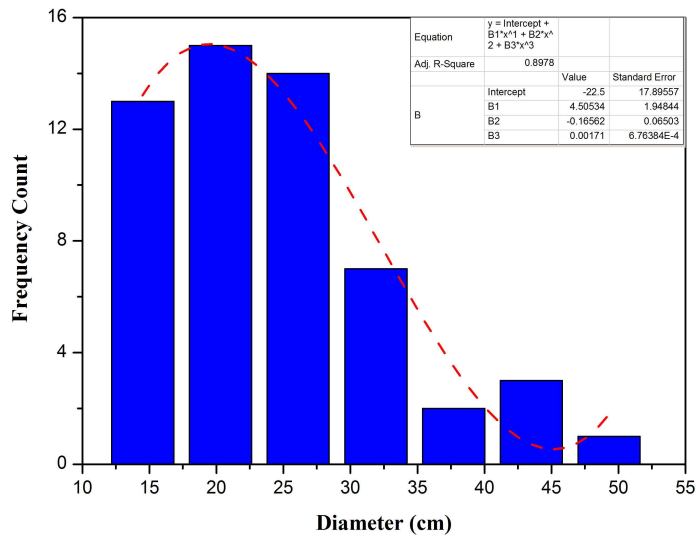
(a) Rock block with targets



(b) Modeling image

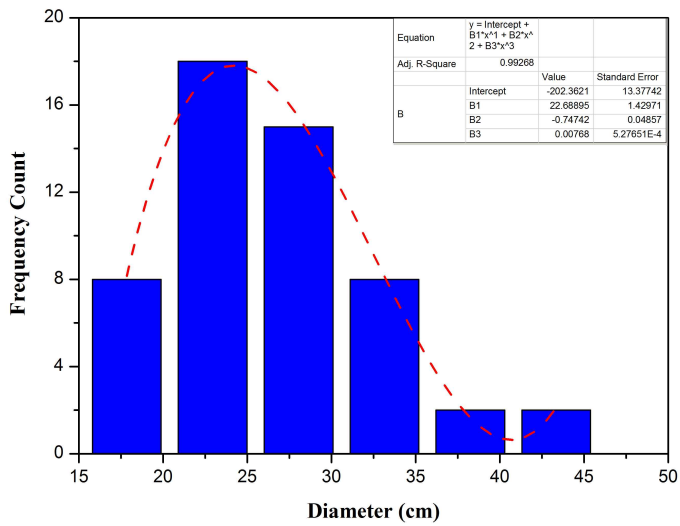
Fig. 4.13 3D modeling for an individual block

4.1.4절에서 언급한 바와 같이, 파쇄 더미에서는 배치 형태로 인해 외부 블록들의 직경이 작게 평가되므로, PhotoModeler Scanner를 이용하여 분석한 직경을 15% 보정하였다. 더미 외측 블록들의 직경 분포는 그림 4.14와 같이 현장 모두에서 대수정규분포를 보였다. Field 1의 경우, 더미 외측 블록의 최소 직경은 12.36cm, 최대 직경은 48.45cm, 평균 직경은 24.22cm, 표준편차는 8.77cm로 분석되었다. Field 2의 경우, 더미 외측 블록의 최소 직경은 17.70cm, 최대 직경은 42.29cm, 평균 직경은 26.57cm, 표준편차는 5.98cm로 분석되었다. Field 3의 경우, 외측 블록의 최소 직경은 11.94cm, 최대 직경은 38.39cm, 평균 직경은 20.24cm, 표준편차는 5.72cm로 분석되었다.

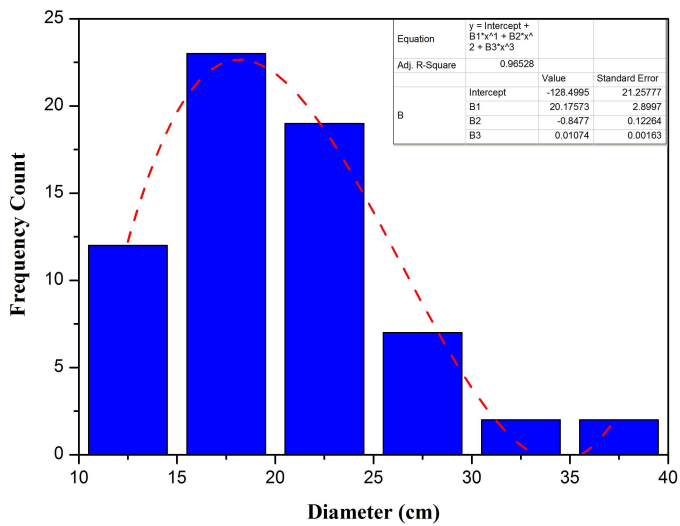


(a) Field 1

Fig. 4.14 Frequency count of surface blocks analyzed with a PhotoModeler Scanner for a muckpile in the field



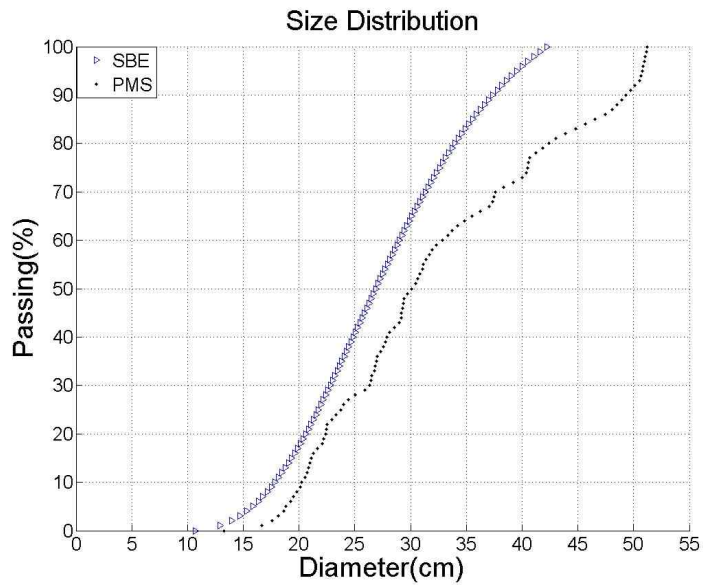
(b) Field 2



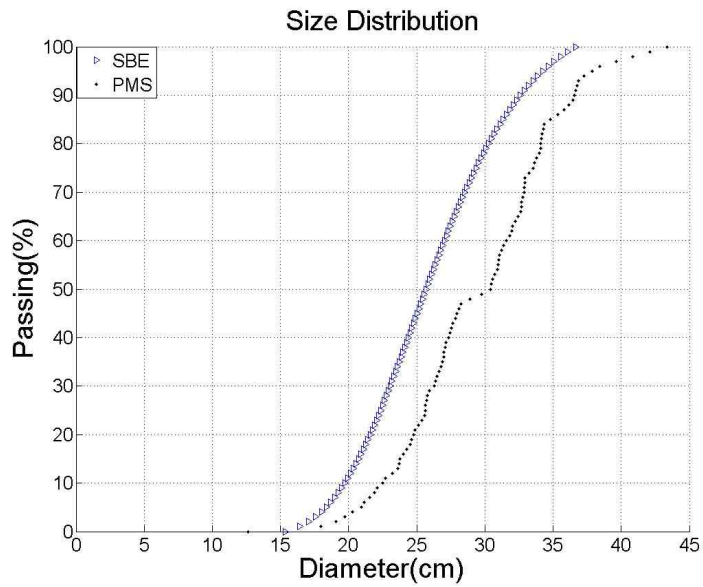
(c) Field 3

Fig. 4.14 Frequency count of surface blocks analyzed with a PhotoModeler Scanner for a muckpile in the field (Continued)

그림 4.15와 4.16은 현장 세 곳에 대한 파쇄도 분석 결과를 나타내며, 각각 직경 정보의 보정 없이 통계 추정된 자료, 더미 외측 직경에 대한 보정 및 상/하한 설정에 대한 통계 추정 자료를 나타낸다. 그림에서 보듯이 실내 파쇄도 분석의 결과와 마찬가지로 더미 외측 직경에 대한 보정 후 상/하한을 설정하여 추정한 결과가 PhotoModeler Scanner(PMS)를 이용하여 분석한 결과와 비교하여 최대/최소 직경이 유사한 수준에서 향상된 결과를 제공함을 확인할 수 있었다. 표 4.4, 4.5, 4.6은 그림 4.16에 대한 해석 결과를 비교 분석한 자료이다. PMS를 이용하여 개별 블록을 분석한 결과와 더미 외측 블록에 기반한 추정(Surface Based Estimation, SBE) 결과와의 차이를 비교/분석한 결과, Field 1의 경우 최대 직경 차이는 6.42cm로 약 13%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{50}$ ) 차이는 0.81cm로 약 3%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 1.88cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 5%의 오차를 보였다. Field 2의 경우 최대 직경 차이는 5.07cm로 약 40%의 오차를 보였는데, 이때의 자료는 통과율 0%에서의 선형 외삽 자료이며 이를 제외한 자료에 대해서 최대 직경 차이는 1.67cm로 약 5%의 오차를 보였다. 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{50}$ ) 차이는 0.90cm로 약 3%의 오차를 보였고, 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 0.58cm로, 백분율로 나타내었을 때 약 2%의 오차를 보였다. Field 3의 경우 최대 직경 차이는 3.10cm로 약 18%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{50}$ ) 차이는 1.45cm로 약 6%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 1.32cm로, 백분율로 나타내었을 때 약 6%의 오차를 보였다.

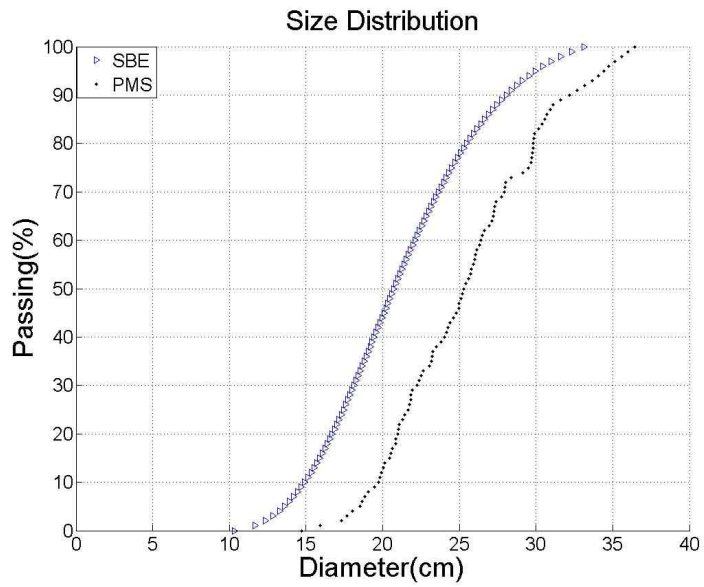


(a) Field 1



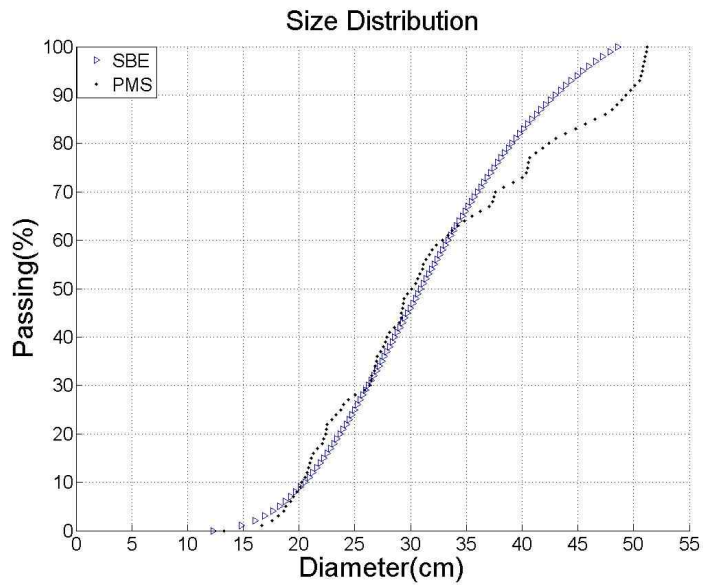
(b) Field 2

Fig. 4.15 Size distributions from the SBE and the water tank measurement without the improvement of input parameters for a muckpile in the field

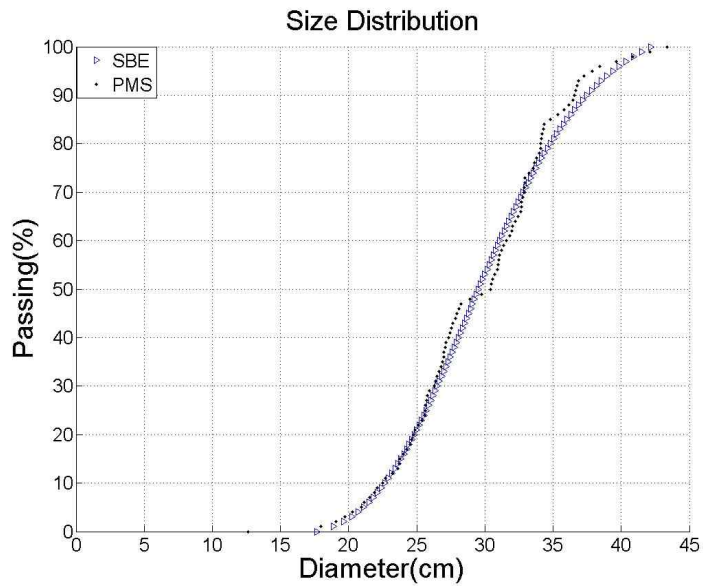


(c) Field 3

Fig. 4.15 Size distributions from the SBE and the water tank measurement without the improvement of input parameters for a muckpile in the field (Continued)

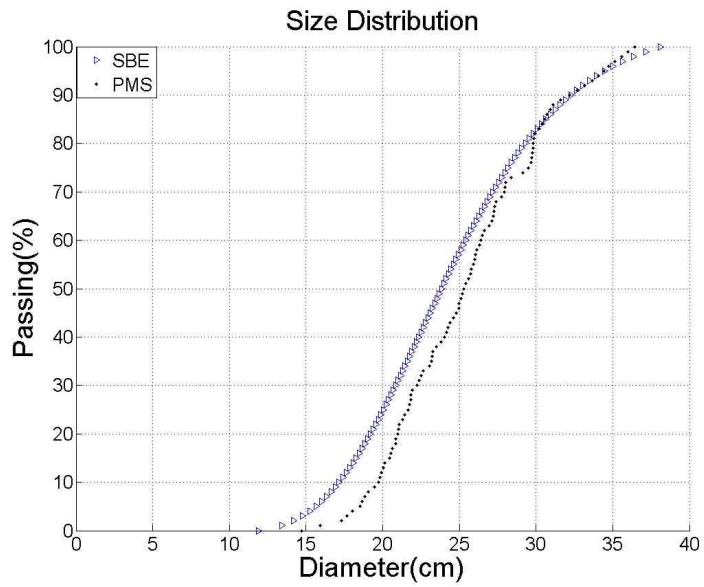


(a) Field 1



(b) Field 2

Fig. 4.16 Size distributions from the SBE and the water tank measurement with the improvement of input parameters for a muckpile in the field



(a) Field 3

Fig. 4.16 Size distributions from the SBE and the water tank measurement with the improvement of input parameters for a muckpile in the field (Continued)



Table 4.4 Errors between the SBE and the water tank measurement: Field 1

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )	Error at $D_{50}$ ( cm / % )	Mean Error ( cm / % )
50	-	0.81 / 3	1.88 / 5
87	6.42 / 13	-	

Table 4.5 Errors between the SBE and the water tank measurement: Field 2

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )	Error at $D_{50}$ ( cm / % )	Mean Error ( cm / % )
0	5.07 / 40	-	0.58 / 2
50	-	0.90 / 3	
93	1.67 / 5	-	

Table 4.6 Errors between the SBE and the water tank measurement: Field 3

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )	Error at $D_{50}$ ( cm / % )	Mean Error ( cm / % )
2	3.10 / 18	-	1.32 / 6
50	-	1.45 / 6	

#### 4.1.6 결과 분석 및 고찰

평면배치에 대한 파쇄도 분석을 통해 입체사진측량기법을 이용한 3차원 파쇄도 분석 가능성을 확인하였다. 더미 형태의 배치에 대해서는 입체사진측량기법을 이용한 파쇄암 모델링 및 더미 외측 블록에 기초한 파쇄도 분석 방법의 적용 가능성을 확인하였으며, 이를 토대로 현장의 파쇄암에 대하여 파쇄도 분석을 수행하였다. 분석 결과, 2차원 영상처리기법에서는 암석의 형상 정보를 2차원 경계 및 면적 정보만을 이용하는 반면, 3차원 모델링에 기반한 입체사진측량기법에서는 촬영된 영상에서 확인되는 암석의 모든 면의 정보를 3차원 모델링 및 부피 계산에 이용하기 때문에 암석 개별 블록에 대하여 향상된 정확도를 갖는 결과를 제공함을 확인할 수 있었다.

통과율 50%에서의 파쇄 직경에 대하여 평면배치에서는 입체사진측량기법을 이용한 해석 결과가 수조를 이용하여 측정한 결과와 매우 유사한 수준으로 분석되었고, 더미배치에서는 Split Desktop을 이용한 해석이 입체사진측량기법을 이용한 결과보다 다소 작은 오차를 보였다. 그러나 이때의 오차는, Split Desktop을 이용한 해석이 입체사진측량을 이용한 분석보다 정확한 결과를 도출했기 때문이 아니라, 3.5절에서 언급한 바와 같이 결과를 과대평가하는 결점이 경우에 따라 유리하게 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 그림 4.6과 같이 더미배치에서 부피 및 직경이 과소평가될 수밖에 없는 상황에서, 우연히 서로 상반된 성격의 왜곡이 중첩됨으로 인해 오차가 작게 발생한 것으로 판단되며, 이는 입도 분포 곡선의 전체적인 형상이나 전 구간에 대한 평균 오차 분석 결과를 통해서도 판단할 수 있었다. 또한 최대 직경 오차에 대하여, 평면배치 및 더미배치 모두에서 입체사진측량기법을 이용한 파쇄도 분석 결과는 수조를

이용하여 측정된 결과와 비교하여 10% 내외의 오차 수준으로, Split Desktop을 이용한 분석 결과와 비교하여 향상된 정확도를 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 전 구간에 대한 평균 오차에서도 입체사진측량기법을 이용한 분석은 평면배치 및 더미배치 모두에서 5% 내외의 오차 수준을 보였다. 이상으로 볼 때, 2차원 해석에서와 같이 우연한 과정에 의해서 오차가 보정되는 것은 일정 정확도를 일관된 성능으로 보장한다고 할 수 없으므로, 이 연구에서 제안한 방법을 통하여 합리적 근거에 따라 결과를 보정하는 것이 공학적으로 바람직한 방법인 것으로 판단된다.

다만, 현장 파쇄 더미 분석 시 암석은 현장 상황, 장비 및 인력의 한계로 인해 인력으로 이동이 가능한 최대 크기로 제한하였으므로 표본 자료에 대하여 편향성이 존재할 수 있다. 이러한 부분의 영향을 줄이기 위하여 서로 다른 장소 및 현장에서, 다양한 형상의 파쇄암에 대하여 파쇄도 분석을 수행하였다. 또한 상기한 바와 같이, 이 연구에서는 인력 등의 제약으로 인해 일정 크기 이상의 파쇄암은 분석 대상에서 제외하였다. 그러나 분석 결과를 통하여 판단할 때, 입체사진측량기법의 장점을 이용하여 넓은 영역에 대하여 영상을 획득하고 모델링한 후 이를 통합한 결과를 이용한다면, 보다 넓은 직경 범위의 파쇄암에 대한 해석이 가능할 것으로 판단된다.

전술한 바와 같이 현장의 전체 파쇄암을 대상으로 하는 분석은 현실적으로 불가능하다. 따라서 이 연구에서는, 전체 현장 스케일의 파쇄도 분석에 앞서 전체 파쇄 더미 중 일정 영역의 파쇄암을 대상으로 일정 수준 이상의 정확도를 갖는 파쇄도 분석 방법을 개발하고자 하였다. 이 연구에서의 파쇄도 분석 방법이 전체 현장 스케일에 대한 적용성을 확보했다고 단정 지을 수는 없으나, 평면배치 및 더미배치에 대한 파쇄도 분석 결과를 종합해 볼 때, 이 연구에서 제안하는 입체사진측량기법을 활용한

파쇄도 분석 방법은 기존의 2차원 분석 방식과 비교하여 실제 암석의 정보를 보다 많이 활용함으로써 보다 우수한 정확도로 현장 적용이 가능할 것으로 판단된다.

2차원 영상처리를 이용한 파쇄도 분석은 영상 경계 분석을 통해 2차원 면적 정보만을 이용함으로써, 3차원 입체사진측량기법을 이용한 결과와 비교하여 해석의 정확도가 부족하였으며, 또한 3.2절에서 언급한 바와 같이, 자동 필터에 의한 경계 추출 후 사용자 입력을 통한 경계 입력을 통해 각 블록을 개별적으로 구분하는 작업이 필요하였다. 반면 3차원 입체사진측량기법을 이용한 파쇄도 분석은 2차원 영상처리기법과 비교하여 향상된 결과를 제공하였으나, 전체 파쇄 더미에 대하여 더미 외측 블록을 개별적으로 모델링 및 분석하는 과정이 필요하였고, 전체 해석 중 이 작업에 대부분의 시간이 소요되었다. 따라서 이 연구에서는 3차원 자료를 이용한 파쇄도 분석 과정을 자동화하는 알고리즘을 개발하였다.

## 4.2 블록 분할 알고리즘 구성

입체사진측량기법을 이용하면 전체 파쇄암에 대한 3차원 점군 자료를 얻을 수 있는데, 실내 및 현장 파쇄암의 3차원 점군 자료를 분석하여 공통적으로 구분되는 특징들을 확인하고, 이를 기초로 파쇄암을 구분하는 블록 분할 알고리즘(Block Delineation Algorithm, BDA)을 개발하였다. 암석은 기본적으로 볼록한(convex) 것으로 가정하였으며, 파쇄도 분석 자료로 이용한 암석들의 공통점을 정리하여 알고리즘을 구성하였다.

그림 4.17은 블록 분할 알고리즘의 기본 개념을 나타낸다. 우선 일정 크기의 관심 영역을 설정한다. 다음으로 전체 파쇄 더미에 대하여 최상위 블록의 가장 높은 점(peak)을 찾고, 이 점이 관심 영역의 내부에 포함되도록 전체 메시(mesh) 자료를 이동한다. 이후 관심 영역 내부에 포함되는 자료에 블록 구분 필터를 적용하여 블록으로 판단되는 자료를 구분한다. 전체 메시지를 회전시키면서 블록 구분 필터를 적용하여 회전을 마친 후 하나의 블록 자료를 구분한다. 이 과정을 전체 블록의 피크에 대하여 반복 수행하여 각각의 블록을 구분한다.

전체 파쇄 더미에 대한 점군 자료는 PhotoModeler Scanner 프로그램을 이용한 모델링 결과를 이용하였으며, 상기한 블록 분할 알고리즘은 Mathwork 社의 Matlab 프로그램 코드를 이용하여 개발하였다. 제안한 알고리즘은 전체적으로 전처리, 자동 블록 찾기, 사용자 입력 블록 찾기, 블록 정보 분석의 4단계로 구분되며 각각의 내용은 다음과 같다.

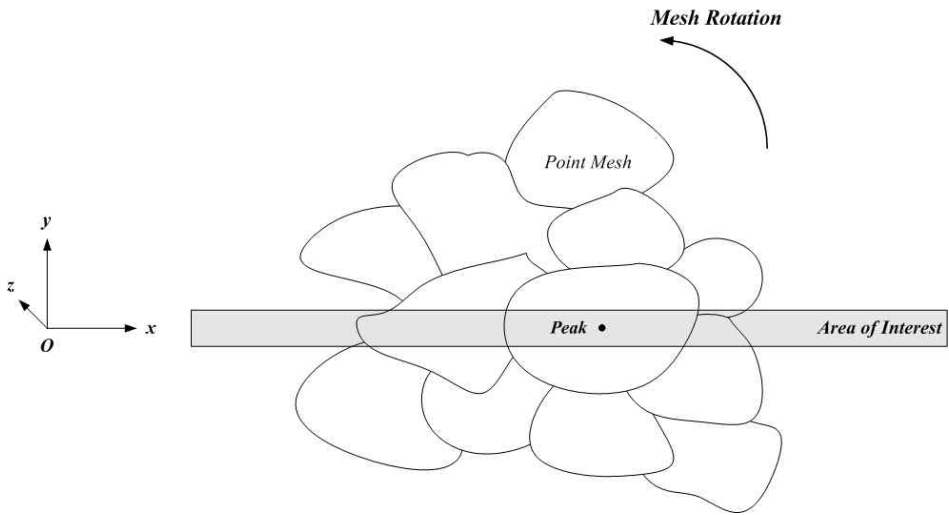


Fig. 4.17 Basic concept of the proposed algorithm

## 4.2.1 전처리

우선 입체사진측량기법을 이용하여 분석한 전체 파쇄 더미에 대한 점군 자료를 불러온다. 입체사진측량기법을 이용한 모델링은 일반적으로 관심 대상에 대하여 안정된 모델링 결과를 제공하지만, 때에 따라 전체 모델과 어울리지 못하는 이상값들이 해석 결과에 포함되게 된다. 이는 영상 정합 시 동일 열(row)에서 공액점을 찾는 과정에서 잘못된 색상 정보를 참조하게 되거나, 또는 스테레오 영상 취득 시 촬영각 또는 빛의 방향에 따라 두 영상의 색상 정보에 차이가 존재하는 경우에 발생할 수 있는 현상이며, 이 경우 모델링 결과에 전체적인 모델링 자료와의 연결성이 떨어지는 자료가 포함될 수 있다. 따라서 암석을 구분하는 알고리즘을 적용하기에 앞서 이러한 불필요한 정보를 노이즈로 정의하고 이를 제거하는 함수를 적용하였으며, 이에 대한 구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

### ▸ 노이즈 제거 함수

- ① 입력한 전체 파쇄암 자료의 개수 저장
- ② 첫 번째 자료  $(a_1, b_1, c_1)$ 이 다른 모든 자료와 이루는 거리 계산
- ③ 구의 방정식  $(x-a_1)^2 + (y-b_1)^2 + (z-c_1)^2 < r^2$ 을 설정하고 해당 구의 영역 내에 포함되는 자료의 개수 카운트
- ④ 상기 구의 영역 내에 포함되는 자료가 존재하지 않을 경우 즉, 모든 자료가 구의 밖에 존재하는 경우, 다른 자료와의 연결성이 부족한 것으로 판단하고 이를 전체 자료에서 제거
- ⑤ 전체 자료에 대하여 ② ~ ④의 과정을 반복 수행

⑥ 최종 자료의 수를 계산하여 이 수가 ①의 수와 같으면, 제거되는 자료가 없는 것으로 판단하여 수행 종료

⑦ 자료의 개수가 서로 다른 경우 ①부터 전체 과정을 다시 수행

여기서, 구의 반지름은 다음에 수행할 내용을 고려하여  $r=2$ 로 설정하였다.

전체 자료에 대하여  $x-y$ 축 방향으로 간격 1이 되도록 전체 메시를 재구성하였다. 입체사진측량기법을 이용한 모델링 자료는 정밀도 설정 크기에 따라 생성되는 자료의 개수에 차이가 있다. 그러나 Matlab 프로그램을 이용한 해석 수행 결과, 자료의 개수가 매우 큰 경우에는 자료를 불러오는 단계 및 자료를 그래프 상에 도시하는 과정에서부터 상당한 시간을 소요하게 되어 알고리즘 전체의 효율이 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 상기 메시 재구성 과정을 통하여 전체적인 자료의 개수를 조절하였다. 이 연구에서 적용한 점군 자료에 대해서는 전체적으로 5만개 내외의 자료가 재구성되었는데, 그 이상의 자료에 대해서도 프로그램 구동이 가능하나 전체 시간 효율이 매우 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 4.18은 입력 메시 재구성 방식을 나타낸다. 이 연구에서는 PhotoModeler Scanner를 이용한 모델링에서 단위를 cm로 설정하였으며, 따라서 그림 4.18에서 간격 1은 1cm를 의미한다.



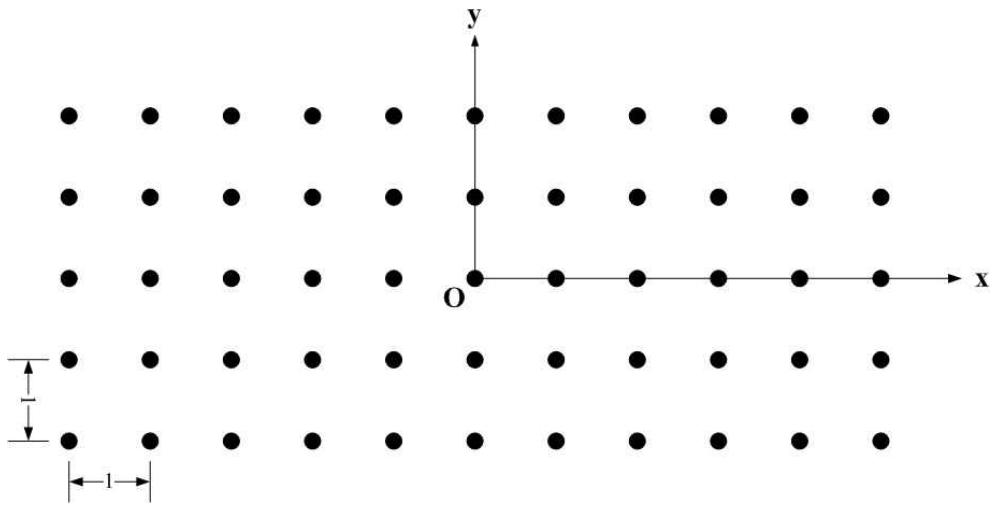


Fig. 4.18 Mesh reconstruction

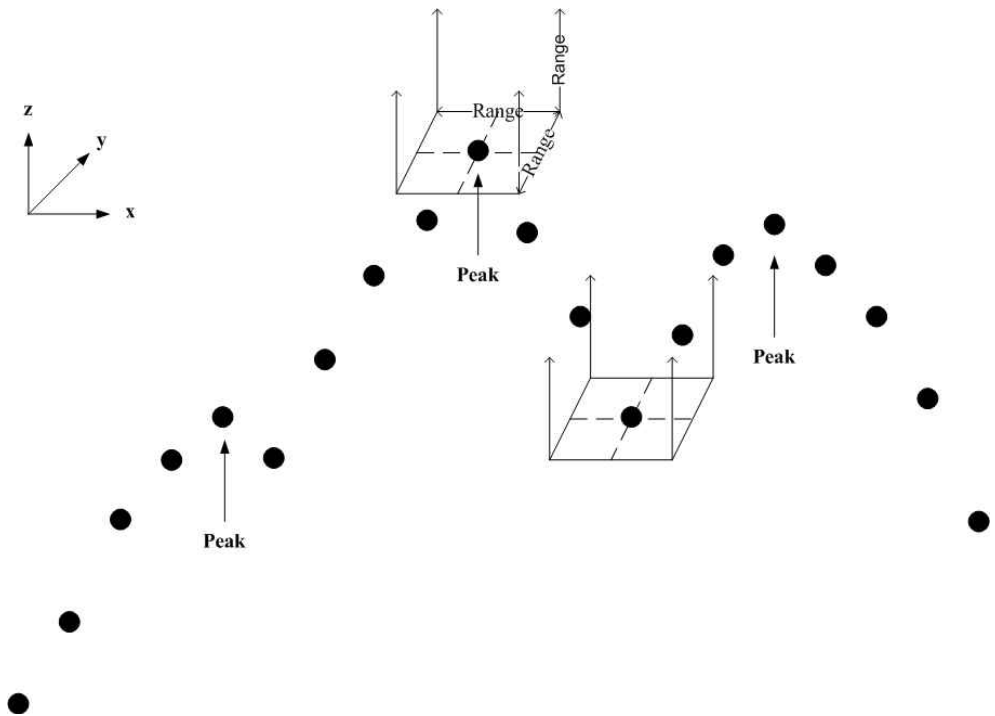


Fig. 4.19 Peak detection

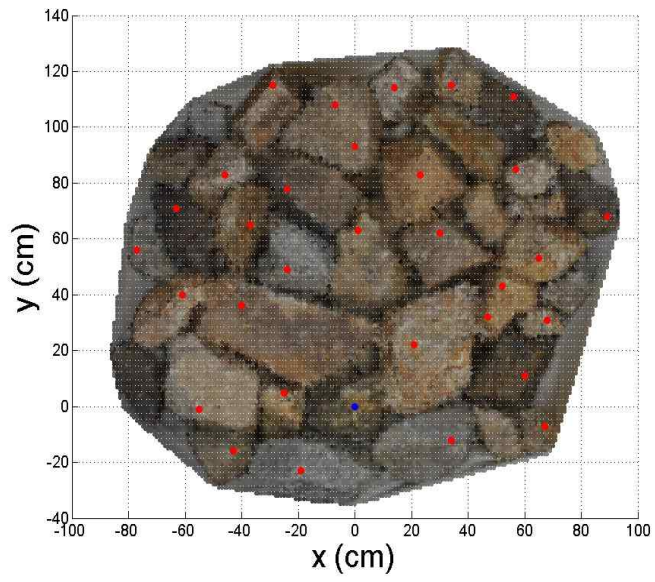
실제 자연에 존재하는 암석은 완전한 평면의 형태로 존재하기 어렵다. 또한 완전한 평면을 인위적으로 완전히 평행하게, 즉, 모든  $z$  좌표가 동일하도록 배치하는 경우를 제외하고는 동일 암석 내에 반드시 가장 큰  $z$  좌표를 갖는 부분이 존재할 것으로 판단하였다. 이 연구에서 제안한 블록 분할 알고리즘은 동일 블록 내에서  $z$  좌표가 가장 큰 위치를 기준으로 전체 알고리즘이 수행되도록 구성하였으며, 따라서 이러한 기준점들을 찾는 과정이 매우 중요하다. 이렇게 가장 큰  $z$  좌표를 갖는 점 자료를 피크(peak)로 정의하였으며, 전체 파쇄 더미에 대하여 1차적으로 피크를 찾는 함수를 작성하였다. 그림 4.19는 이 연구에서 정의한 피크를 나타내며, 이에 대한 구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

▸ 피크 찾기 함수

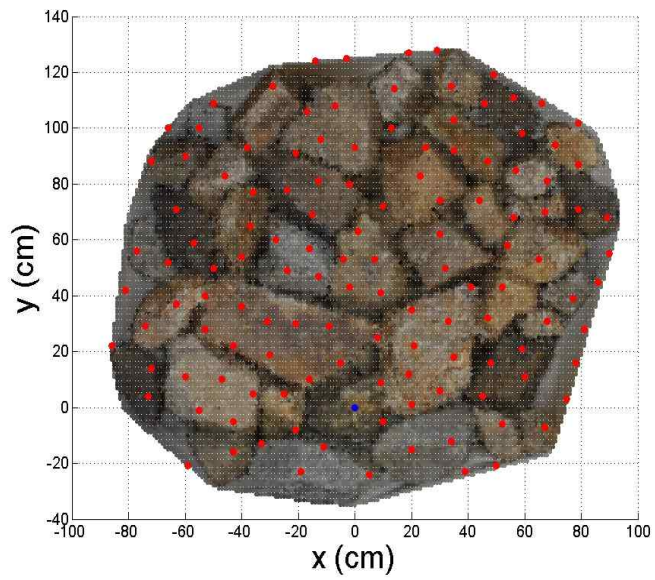
- ① 입력 자료 중 첫 번째 자료를 기준점으로 하고,  $x$ 축 및  $y$ 축에 대하여 좌/우 방향으로 일정 크기의 관심 영역을 설정,  $z$  방향으로는 기준점의  $z$  좌표값 이상인 곳을 관심 영역으로 설정
- ② 그림 4.19와 같은 무한한 높이를 가지는 직육면체의 관심 영역이 설정되면, 해당 관심 영역 내에 포함되는 자료의 개수를 카운트
- ③ 관심 영역 내에 다른 자료가 포함되지 않는 경우, 이를 해당 파쇄암의 피크로 판단 및 저장, 다른 자료가 포함되는 경우 피크가 아닌 것으로 판단
- ④ 입력 자료 전체에 대하여 전체 과정을 반복 수행

이러한 알고리즘을 적용하면 그림 4.19의 경우 3개의 피크가 검출되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 4.19에서 보듯이, 초기 관심 영역 설정 단계에서 범위를 너무 크게 설정하면 피크가 잘 검출되지 않고, 반대

로 너무 작게 설정하면 너무 많은 수의 피크가 검출되는 것을 알 수 있다. 그림 4.20은 이러한 차이를 보여준다. 따라서 해석 대상 전반에 대하여 고르게 피크가 검출될 수 있도록 관심 영역의 크기를 적절히 설정하는 것이 좋다. 2차원 영상처리기법을 이용한 경우와 3차원 입체사진측량기법을 이용하는 경우 모두 사진측량기법을 이용한 해석이므로, 전체 파쇄 더미에 대하여 초기에 영상을 확보하게 된다. 따라서 초기에 확보한 전체 파쇄 더미 영상에 대하여 피크가 적절히 검출되도록 상기 관심 영역의 크기를 설정하는 것이 좋을 것으로 판단된다.



(a) Lowest number of peaks



(b) Excessive number of peaks

Fig. 4.20 Peak detection results according to the size of the area of interest

## 4.2.2 블록 찾기

전처리 단계에서 검출한 피크 자료를 기준으로 블록 찾기를 수행한다. 블록 찾기는 크게, 자료의 평행이동, 관심영역 설정, 블록 구분 필터 적용, 블록 정보 분석의 총 4단계로 구분되며, 각각에 대한 구체적인 알고리즘은 다음과 같다.

### ▸ 자료 평행이동 함수

- ① 전처리 단계에서 검출한 피크 자료를 크기순으로 내림차순 정렬
- ② 첫 번째 피크 정보가  $(x, y, z) = (0, 0, z)$ 이 되도록 전체 자료를 평행이동
- ③ 첫 번째 피크 정보 삭제
- ④ 블록 구분 필터 적용 및 블록 정보의 분석이 끝난 후, 마지막 피크 자료까지 ① ~ ③을 반복 수행

### ▸ 관심 영역 설정 함수

전처리 단계에서 자료가  $x-y$ 축 방향으로 1의 간격을 갖도록 전체 메시를 재구성하였다. 이 자료에 대하여  $y=0$ 인 위치를 조하하면, 초기 자료의 경우 그림 4.21과 같이 일정 간격으로 배치되어 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 전체 알고리즘의 기본 개념도인 그림 4.17과 같이 점군 자료를 회전시키게 되면, 그림 4.22와 같이  $y=0$ 인 위치에서 자료의 개수 및 연결성이 부족해지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 블록 구분 필터를 적용하기에 앞서 일정 관심 영역을 설정하여, 이 영역에 포함되는 자료를 블록 구분 필터 적용 대상 자료로 이용하였다. 또한 이 연구에서 제안하는 블록 구분 필터는  $y=0$ , 즉,  $x-z$  평면상에서 블록의 영역으로

판단되는 최종  $x$  자료의 범위를 찾고 이를 다시 본래의 3차원 점군 자료에서 복원하는 방식이다. 따라서 그림 4.22와 같이 일정 영역 내에 존재하는 자료를  $x-z$  평면에 투영하여 이용하였다. 마지막으로, 자료 평행이동 함수의 원리에 따라, 현재의 피크는 항상  $x=0$ 인 곳에 위치하게 되며, 이에 대하여 피크가 포함되도록  $x \geq 0$ ,  $x \leq 0$ 의 두 영역으로 나누어 분석을 수행하였다. 관심 영역의 크기는 전처리 단계에서 자료의 재구성 간격을 고려하여,  $-1 < y < 1$ 로 설정하였다.

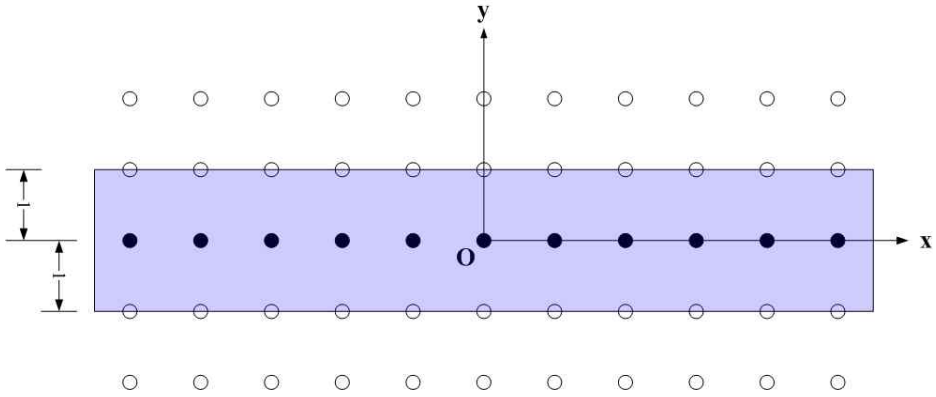


Fig. 4.21 Data inside the area of interest

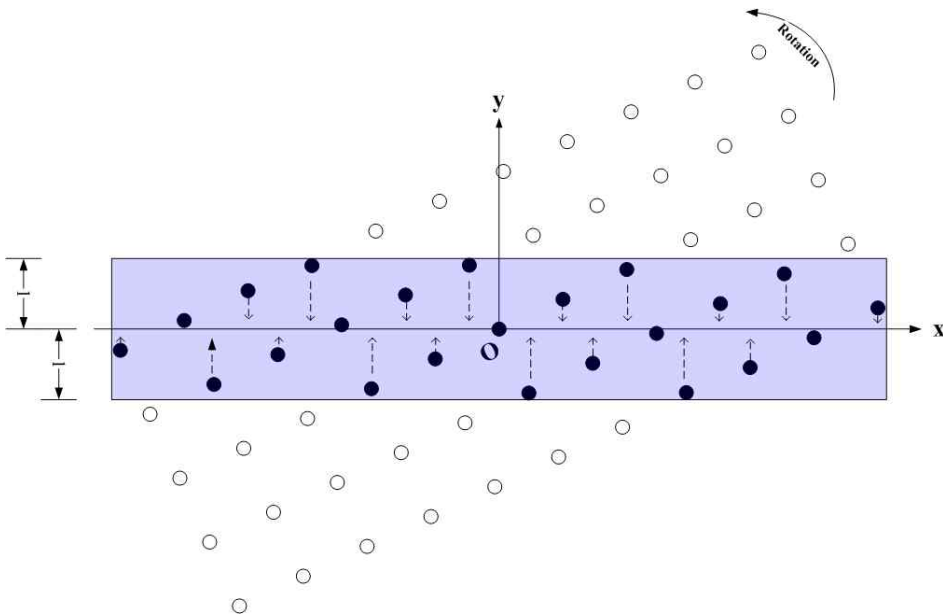


Fig. 4.22 Data of interest after rotation

그림 4.22와 같이 관심 영역 설정 단계에서 자료의 개수 및 연결성을 확보하기 위하여  $x-z$  평면에 투영한 일정 영역 내의 자료를 이용하게 되면, 자료의 높이 자료가 급격히 변하거나 자료의  $x$ 축 간격이 일정하지 않게 되는 등의 자료 속성이 변하게 된다. 이는, 동일 블록 내에서 실제의  $x-z$  평면의 자료를 이용하는 것이 아니라, 일정 영역 내의 자료를  $x-z$  평면으로 투영한 후 이용하기 때문에 발생하는 현상이다. 만약 설정된 관심 영역 내에서 특정 방향으로 블록의 높이가 급격하게 변하는 곳이 존재하는 경우,  $x-z$  평면에 투영되는 이러한 자료는 결과에 부정적인 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 영향을 줄이기 위하여  $x-z$  평면에 투영된 자료에 대하여 일차적으로 2차원 노이즈 제거를 수행한다. 또한 그림 4.22와 같은 자료를 이용하는 경우, 그림 4.23과 같이 자료의  $x$ 축 간격이 일정하지도 않고,  $z$  좌표값의 변화로 인해 암석 블록의 전체적인 형상이 부정확하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 현상을 보완하기 위하여 다음의 과정을 수행하였다.

▸ 블록 형상 찾기 함수

- ① 전체 자료의 수 계산, *total number*
  - ②  $i \sim (i+4)$ 번의 자료에 대하여,  $i=1$ 로 시작하여 자료를 임시 변수에 저장
  - ③ 저장된 자료 중 가장 큰  $z$  좌표값을 첫 번째 자료의  $z$  좌표로 변경하여 저장
  - ④  $i+1$ 을 수행
  - ⑤  $i \sim (i+4)$ 번의 자료에 대하여,  $i+4=total\ number$ 가 될 때까지, ① ~ ④의 과정을 반복 수행 (단, 마지막 4개의 자료는 이용하지 않음)
- 그림 4.24는 블록 형상 찾기 함수를 적용한 후의 결과를 나타낸다.



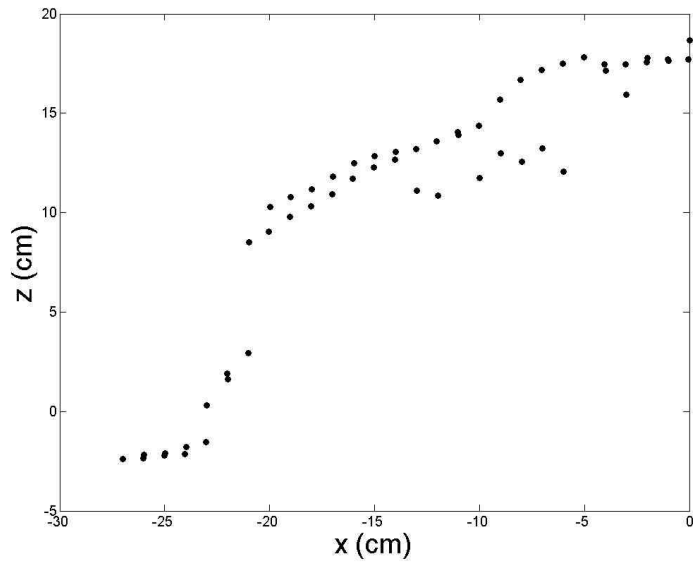


Fig. 4.23 Data before refinement

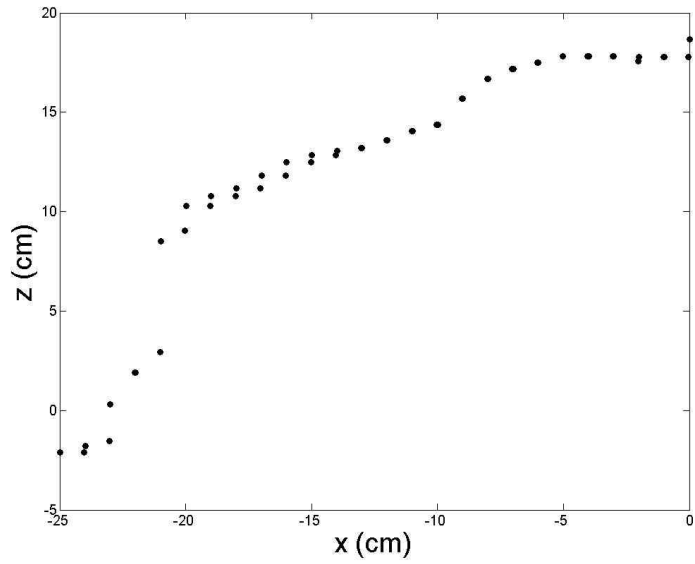


Fig. 4.24 Block-shape refinement

블록의 형상이 구형(sphere)이고 이러한 블록들이 나란히 이웃하여 존재하는 경우를 생각하면, 그 사이에 골 또는 계곡(valley)이 존재하게 되는 것을 쉽게 알 수 있다. 따라서 이러한 계곡의 위치를 기준으로 한다면 블록을 구분할 수 있다. 이 연구에서는 이러한 특징을 이용하여 블록을 구분하기 위한 알고리즘을 작성하였으며, 기본 원리는 초기점 자료와 마지막 점 자료를 잇는 직선을 구성하고 모든 점군 자료가 이 직선 위에 존재하면 동일 블록인 것으로 간주하도록 작성하였다. 블록 형상 찾기를 완료한 자료에 대하여 다음의 알고리즘을 적용하였다.

• 경사도를 이용한 계곡 찾기 함수

① 전체 자료의 수 계산, *total number*

② 식 (4.8)과 같이 첫 번째 자료와 마지막 자료를 잇는 직선의 방정식 구성

$$z = \frac{z_{end} - z_1}{x_{end} - x_1} \times (x - x_1) + z_1 \quad (4.8)$$

③ 전체의  $x_i$  자료에 대하여, 식 (4.8)에서 계산된 직선상의  $z$  좌표값과 본래의  $z$  좌표값인  $z_i$ 와 차이를 계산하여 저장

④ 단계 ③에서 계산된 차이값 중 가장 큰 값,  $z_{max}$ 와 해당 위치를 저장

⑤  $z_{max} \geq 1$ 이면 해당 위치까지의 자료만을 저장한 후 ① ~ ⑥의 과정을 반복 수행하며, 모든 자료에 대한 검사를 마치면 함수 수행 종료

⑥  $z_{max} < 1$ 이면 *count=0*으로 설정하고 다음을 수행

⑦ 식 (4.8)을 이용하여  $z_{max}$  정보 분석

- ⑧  $z_{\max} \geq 1$ 이면 해당 위치까지의 자료만을 저장하고, 단계 ①로 이동
- ⑨  $z_{\max} < 1$ 이면  $count+1$ 을 수행하고, 전체 자료에서 마지막 자료를 제외한 후, ⑦ ~ ⑨의 과정을 반복 수행
- ⑩  $total\ number = count$ 이면, 현재의 모든 점군 자료가 동일 블록 자료인 것으로 판단하고 함수 수행 종료

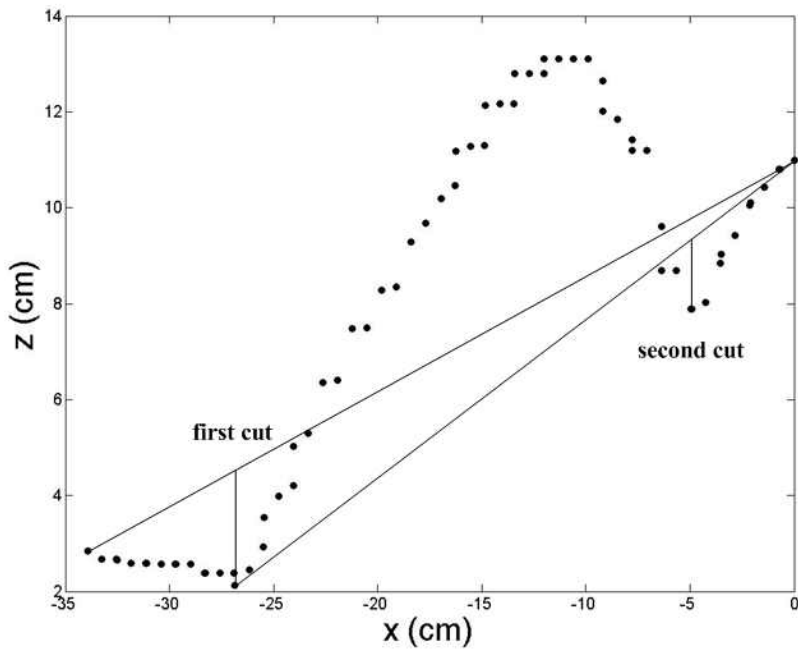


Fig. 4.25 Cutting at the valley

그림 4.25는 계곡 찾기 함수에서 ① ~ ⑤ 단계의 과정을 나타내고 있다. 우선 첫 번째 자료와 마지막 자료를 잇는 직선에 대하여, 직선으로부터 실제 자료의  $z$  좌표값까지의 거리를 계산하고 이 중 가장 큰 값,  $z_{\max}$ 와 해당 위치를 저장한다. 만약  $z_{\max} \geq 1$ 이면, 동일 블록이 아닌 것

으로 간주하고 해당 위치 뒷부분의 자료는 제거한다. 남은 자료에 대하여 동일 과정을 반복하여  $z_{\max} \geq 1$ 인 곳 뒷부분의 자료를 모두 제거한다. 그림 4.26은 계곡 찾기 함수에서 ⑥ ~ ⑩ 단계의 과정을 나타낸다. 그림 4.25의 과정을 거친 자료에 대하여, 첫 번째 자료와 마지막 자료를 잇는 직선을 구성하고 모든 자료가 직선 위에 있는지, 즉,  $z_{\max} < 1$ 인지를 검사한다. 마지막 자료를 제외하고 다시 식 (4.8)의 직선의 방정식을 구성하여 모든 자료가 직선 위에 존재하는지를 검사한다. 동일 과정을 반복하여 마지막 자료까지 모두 직선 위에 존재하는 경우 동일 블록인 것으로 판단하고 블록 자료로 저장한다.

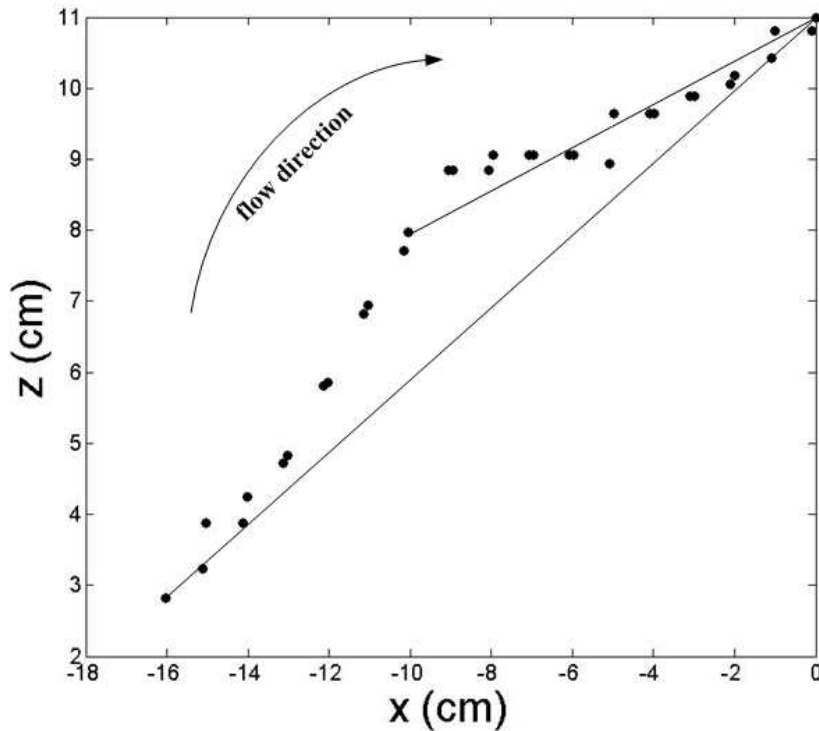


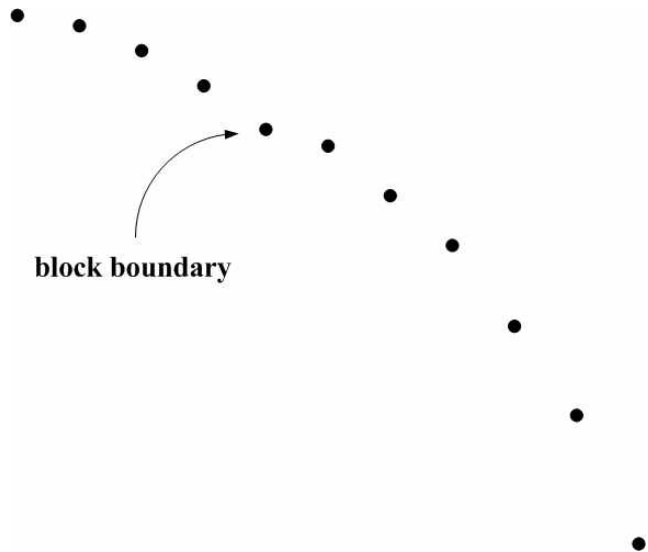
Fig. 4.26 Block data delineated using the Block Delineation Algorithm

이 연구에서 제안하는 블록 분할 알고리즘은 이러한 방식을 이용하여 블록으로 판단되는  $x$  방향의 범위를 결정한다. 그러나 이렇게 얻어진 결과는 그림 4.24에서 보듯이 일정 부분 가공된 자료이며, 또한  $(x, z)$  좌표 정보만을 갖는 자료이므로, 상기 결정된  $x$  방향 범위의 자료를 가공 이전의 초기 자료에 대한  $x$  방향 자료와 비교함으로써 본래의  $(x, y, z)$  좌표 정보를 다시 저장한다.

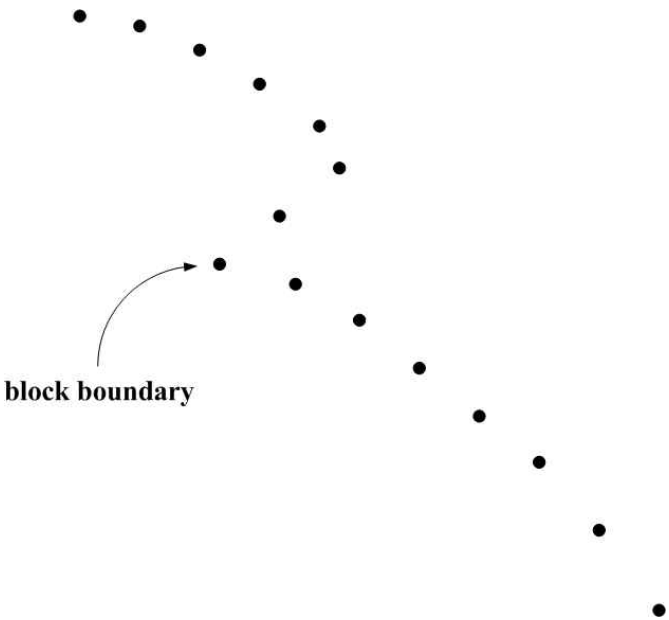
전체 점군 자료를 일정 각도만큼 회전시킨 후, 다시 관심 영역 설정 단계에서 최종 블록 자료 구분 단계의 과정을, 회전각이  $\text{deg} < 180^\circ$  인 동안 반복 수행한다.  $\text{deg} = 180^\circ$  의 자료는  $\text{deg} = 0^\circ$  와 비교하여 좌/우 방향만 바뀐 자료이므로  $\text{deg} < 180^\circ$  까지 수행하며,  $\text{deg} = 2^\circ$  로 설정하였다. 상기한 알고리즘은 회전에 대한 일정 영역의 자료를 이용하는 방식이므로 최종 결과에 중복 자료가 존재하게 된다. 따라서 최종 결과를 검사하여 중복 자료를 제거하고 단일 자료만을 최종 블록 결과로 저장한다. 마지막으로, 그림 4.20과 같이 하나의 블록 내에 여러 개의 피크가 검출되는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 최종적으로 구분된 블록 자료와 전처리 단계에서 검출한 피크 자료를 비교하여, 만약 블록 자료에 포함되는 피크 자료가 있다면 이를 제거함으로써 동일 블록에 대한 재검사가 수행되지 않도록 하였다.

### 4.2.3 사용자 입력을 통한 블록 찾기

상기한 블록 분할 알고리즘은 기본적으로  $z$  좌표값의 변화를 이용하고 있다. 그러나 특히 더미배치 블록의 경우에는 그림 4.27(a)와 같이 블록의 경계가 모호하거나, 그림 4.27(b)와 같이 상단 블록의 위치로 인해 하단 블록에서 피크가 검출되지 않아 블록 찾기 함수가 적용되지 않는 경우가 발생하게 된다. 따라서 이러한 경우에는 사용자가 블록의 경계를 입력하여 블록을 구분할 수 있도록 하는 함수를 작성하였다. 이 함수의 기본 개념은, 사용자가 마우스를 통하여 블록이라고 생각되는 경계 부분의 위치를 입력하면, 해당 영역의 자료를 따로 저장한 후 블록 끝부분의 경계부를 처리하여 블록을 구분하는 것이다. 단, 마우스를 이용한 암석 경계의 입력은 폐합 도형의 형상이 볼록한(convex) 도형이 되도록 입력한다. 이렇게 볼록한 형상의 경계를 입력한 후 1차적으로 경계 내부의 자료를 임시 저장하게 되는데, 그림 4.28은 오각형 형태로 입력된 경계에 대한 내부 자료 추출 방법을 예시한 것이다. 우선 입력된 경계 꼭짓점 정보를 저장한다. 어떤 하나의 점 자료에 대하여, 이 점과 경계의 각 꼭짓점을 잇는 벡터를 생성한 후, 그림 4.28과 같이 인접한 벡터 사이의 내적을 통하여 벡터 사잇각을 계산한다. 이 과정을 반복하여 각 벡터 사이의 사잇각을 계산하게 되는데, 만약 초기의 점 자료가 그림 4.28과 같은 경계 내부의 점이라면, 벡터 사잇각의 총 합은  $360^\circ$ 가 된다. 전체 메시 자료에 대하여 상기의 과정을 통하여 경계 내부의 자료 여부를 1차적으로 분석하여 저장하며, 이 자료에 대하여 블록 경계부를 처리하기 위한 함수를 적용한다.



(a) Ambiguous boundary



(b) Failure to detect peak

Fig. 4.27 Cases where the proposed algorithm is not applied

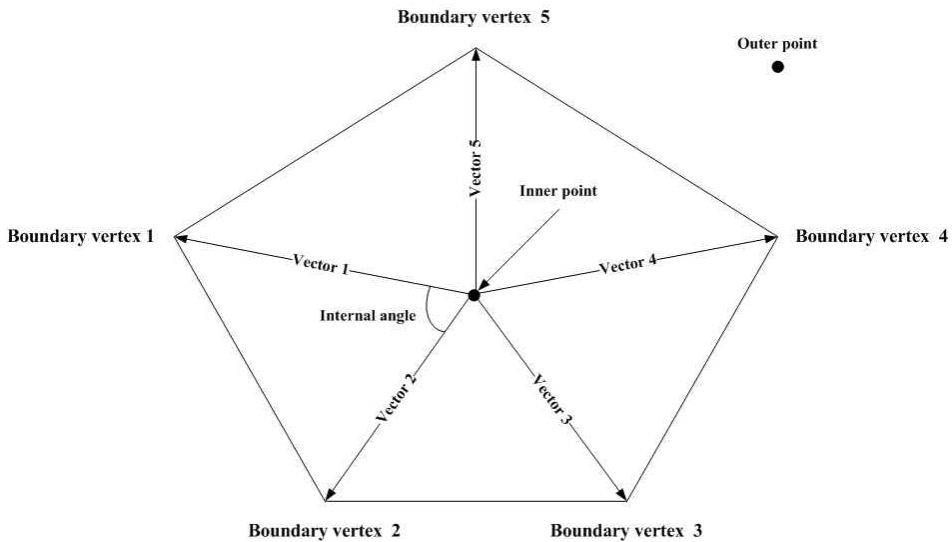


Fig. 4.28 Method for inner point identification

이전의 블록 찾기 과정에서는 피크 자료를 검출하고 이를 기준점으로 하여 블록의 경계를 찾는 과정을 수행하였다. 그러나 여기서와 같이 사용자가 경계를 입력하는 경우에는 피크 검출 등의 과정을 수행하지 않고 경계부, 즉 끝부분만을 처리하도록 하는 함수를 작성하였다. 우선 경계부를 처리하기에 앞서 경계 내부의 위치 정보를 하나 입력받는다. 이에 대하여 입력받은 위치 정보가  $(x, y, z) = (0, 0, z)$ 이 되도록 경계 내부의 자료 전체를 평행이동 시킨다. 이후 상기 경계 내부의 점 자료들에 대하여 이전의 방식과 마찬가지로,  $-1 < y < 1$ 의 자료를 저장한다. 이 자료에 대하여 이전의 방식에서는 검출된 피크를 기준으로 좌/우 영역의 자료로 나누어 블록 검사를 수행하였으나, 여기서는 상기 마우스로 입력받은 경계 내부의 점을 이용하여  $-1 < y < 1$ 의 자료를 좌/우 자료로 나눈다. 이렇게 좌/우로 나눈 자료에 대하여 경계 끝부분에 그림 4.29와 같이 일정



영역을 설정하고, 이 영역 내에서  $z$  좌표값이 가장 작은 위치를 저장하여 이를 블록의 최종 경계로 이용한다. 다시 경계 내부의 점 자료들을 일정각 회전시키고 동일 과정을 통하여 블록 찾기 과정을 완료하며, 이전과 마찬가지로 중복 검사를 수행하여 단일 자료만을 최종 결과로 저장한다. 검사 영역은 끝부분 10개 자료로 설정하였으며, 회전각은  $2^\circ$ 로 설정하여 전체 과정을 회전각  $\text{deg} < 180^\circ$ 인 동안 반복 수행하였다.

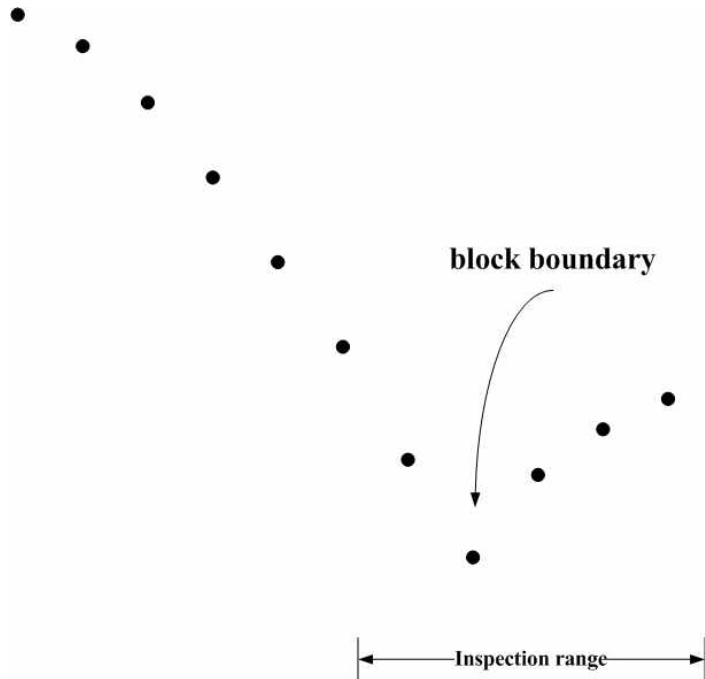


Fig. 4.29 Block boundary decision in the manual analysis process

상기한 과정에 대한 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

▸ 사용자 입력을 통한 블록 찾기 함수

- ① 마우스를 이용한 경계 입력 및 위치 정보 저장
- ② 검사 대상 자료 중 첫 번째 자료와 마우스로 입력받은 경계 자료 중 초기 2개의 자료에 대하여 벡터 생성,  $\vec{A}, \vec{B}$
- ③ 식 (4.9)와 같이 벡터의 내적을 이용하여 벡터의 사잇각 계산

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| |\vec{B}|} \right) \quad (4.9)$$

- ④ 검사 자료와 모든 경계 입력 자료에 대하여 ② ~ ③의 과정을 반복 수행하여  $\sum \theta = 360$ 이면, 경계 내부의 점으로 저장
- ⑤ 검사 대상 전체 자료에 대하여 ② ~ ④의 과정 반복 수행
- ⑥ 마우스를 이용하여 경계 내부의 임의의 점 정보 입력 받기
- ⑦ 단계 ⑤에서 판별된 경계 내부 전체 자료를, 단계 ⑥에서 입력받은 좌표 정보가  $(x, y, z) = (0, 0, z)$ 이 되도록 평행이동
- ⑧ 영역  $-1 < y < 1$ 의 자료를 선별하고, 좌/우 자료로 구분
- ⑨ 경계 끝부분 처리를 통하여 블록 경계 판별
- ⑩ 단계 ⑤의 자료를 일정각 회전 후 ⑧ ~ ⑨의 과정 반복 수행
- ⑪ 총 회전각이  $\text{deg} < 180^\circ$  인 동안 ⑧ ~ ⑩의 과정 반복 수행
- ⑫ 중복 검사를 수행하여 단일 자료만 저장
- ⑬ 추가 분석이 필요한 경우, ① ~ ⑫의 전체 과정을 반복 수행

#### 4.2.4 블록 정보 분석

블록의 직경 정보를 분석하기에 앞서, 블록으로 검출되는 자료에 대하여 부피를 계산한다. 전처리 단계에서 그림 4.18과 같이  $x-y$ 축 방향으로 1의 간격이 되도록 자료를 재구성하였는데, 이에 대하여 이 연구에서는, 블록은 가로 및 세로의 길이가 1(이 연구에서는 1cm)이고 높이  $z$ 인 직육면체, 즉 사각 기둥의 모임으로 이루어지는 것으로 가정하였다. 따라서 블록의 부피는, 블록으로 검출된 자료들의  $z$  좌표 정보의 합으로 표현할 수 있다. 그러나 더미배치에서 블록을 검출하여 이 블록을 단독으로 공간에 도시하면 블록이 공중에 떠 있는 모습이 된다. 따라서 결과 블록 정보들 중 가장 작은 높이 정보를 갖는 자료가  $(x, y, z) = (x, y, 0)$ 이 되도록 전체 자료를 이동한다. 즉 공중의 블록을 바닥면으로 내리는 작업을 수행한 후 최종 부피를 계산하였다. 또한 4.1.2절에서 암석은 완전한 구체의 형상을 갖는 것으로 가정하였으므로, 상기 부피에 대하여 식 (4.1)을 이용하여 블록의 직경을 계산하였다.

이 연구에서의 알고리즘은 점군 자료를 이용하여 블록을 분석하는 방식이므로, 만약 다른 블록에 속하는 점군 자료가 결과에 포함되었을 경우, 그림 4.30과 같이 부피가 과대평가 될 수 있다. 실제의 최소 높이 정보를 갖는 자료를 기준으로 블록 전체를 바닥면으로 내리게 되면, 각 점에 대하여 빗금 친 부분만큼의 부피를 갖게 되나, 그림과 같이 다른 블록의 정보가 포함되는 경우, 잘못된 블록의 최소  $z$  좌표 정보를 이용함으로써 각 점에 대하여 격자로 표시된 부분만큼의 부피가 과대평가된다. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여, 그림 4.30과 같이 자료의 연결성이 부족한 자료를 노이즈로 판단하고, 최종적으로 구분된 블록 자료에 노이즈 제거 함수를 적용하였다. 노이즈 제거 함수는 전처리 단계에서 개발

한 함수를 이용하였으며, 자동 및 사용자 입력을 통한 블록 찾기 결과 모두에 동일하게 적용하였다. 또한 평면배치 및 더미배치 분석에서도 동일하게 노이즈 제거 함수를 적용하였다.

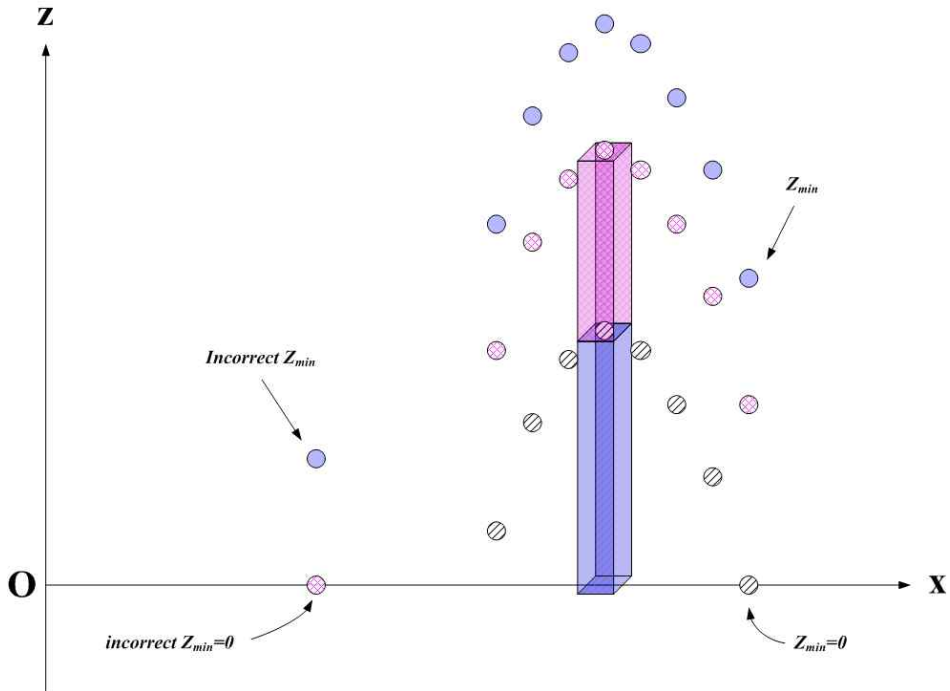


Fig. 4.30 Case where the block volume is overestimated

### 4.3 개발 기법의 통합

4.1절의 더미배치에 대한 통계 추정 기술과 4.2절에서 개발한 블록 분할 알고리즘을 통합하였다. 이에 앞서, 더미 전체에 대하여 입체사진측량 기법을 이용하여 더미의 3차원 정보를 분석하고 이에 대한 점군 자료를 얻는다. 이 연구에서는 PhotoModeler Scanner 프로그램을 이용하여 더미 전체의 3차원 정보를 분석하였다. 여기서 얻은 정보에 블록 분할 알고리즘을 적용하였으며, 이후 이 정보들에 대하여 4.1절의 통계적 추정 기술을 적용하는 통합 알고리즘을 작성하였다. 그림 4.31은 통합 알고리즘의 자료 처리 흐름을 나타낸다.

우선, 통합 알고리즘에서 3차원 점군 자료를 불러온다. 자료를  $x-y$ 축 방향으로 1의 간격이 되도록 재구성하며, 1차적으로 노이즈를 제거한다. 전체 자료에서 피크로 판단되는 자료들을 검출하고, 첫 번째 피크 자료를 기준으로  $(x, y, z) = (0, 0, z)$ 이 되도록 전체 자료를 평행이동시킨다.  $-1 < y < 1$ 의 영역을 설정하여 해당 영역에 속하는 자료들에 블록 구분 필터를 적용한다. 일정 각을 회전시키며 총 회전각이  $\text{deg} < 180^\circ$ 인 동안 블록 필터를 적용한다. 하나의 블록이 검출되면 이를 저장하고, 메시 자료가 더 이상 남아있지 않을 때까지 블록 검출을 반복한다. 모든 메시에 대한 검사가 끝나면, 사용자에게 의한 입력을 통하여 블록을 검출한다. 최종 블록 정보에서, 잘못 검출된 것으로 판단되는 자료를 제거하고, 이를 이용하여 통계 추정을 수행한다. 우선 빈도 분석을 통하여 더미 외측 블록들의 직경 분포를 파악한 후 이를 기반으로 통계 추정을 수행한다. 전체 더미에 대한 추정이 끝나면 이에 대한 최종 입도 분포를 얻고 결과를 저장 및 도시한다.

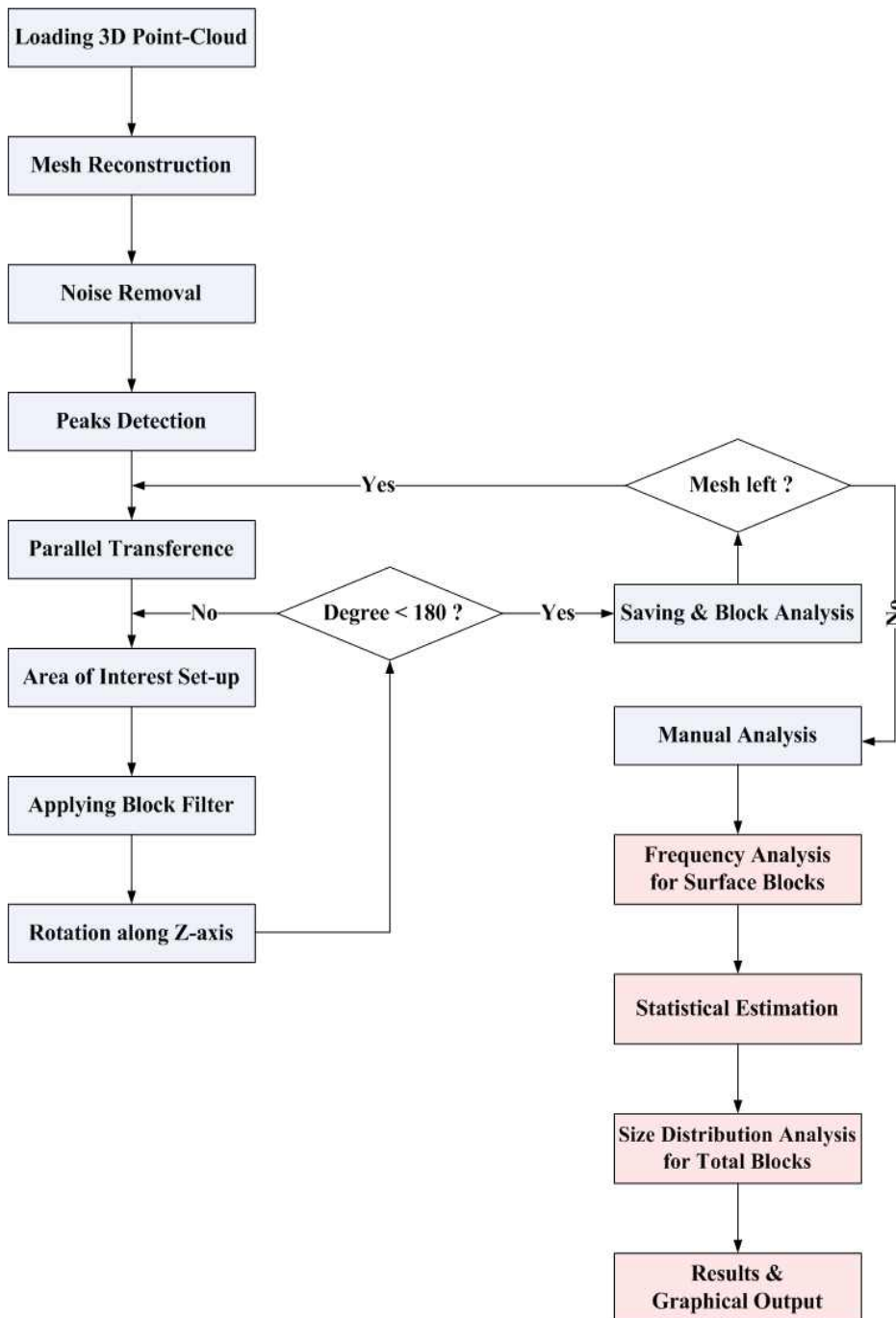


Fig. 4.31 Flowchart of the integrated algorithm

## 5. 개발 기법의 적용성 평가

통합 알고리즘의 적용성을 분석하기 위한 해석을 수행하였다. 해석 자료는 3장과 4장의 실내 및 현장 파쇄암의 3차원 점군 자료를 이용하였으며, 통합 알고리즘을 적용하여 블록을 구분하고 이 정보를 바탕으로 통계 추정을 수행하였다. 평면배치에서는 블록 분할 알고리즘만을 적용하여 전체 파쇄암의 입도 분포를 분석하였으며, 더미배치에서는 블록 분할 알고리즘을 적용하여 더미 외측 블록들의 정보를 분석한 후, 이를 바탕으로 통계 추정을 수행하였다.

### 5.1 평면배치에 대한 적용

평면배치 형태에 대하여 개발 알고리즘을 적용하였다. 평면배치에서는 더미 전체 자료를 확인할 수 있으므로 추가적인 통계 추정이 필요하지 않으며, 따라서 분석된 자료만을 이용하여 입도 분포를 분석하였다. 그림 5.1은 개발 알고리즘에서 블록을 구분하는 모습을 나타낸다. (1,1)의 영역에는 블록 분할 알고리즘을 통하여 구분되는 블록들을 평면도 상에서 누적으로 표시하였으며, (1,2)의 영역에는 현재 구분된 블록을 평면도 상에서 표시하였다. 두 영역 모두 전처리 과정에 의하여 검출된 피크를 같이 도시하여, 분할 작업이 끝난 블록과 아직 분할되지 않은 블록들의 상황을 알 수 있도록 하였다. 또한 블록이 구분되면 (1,2)의 좌측 상단에 현재의 블록 번호를 표시하여, 잘못된 블록이 있는 경우 후에 해당 정보를 제거할 수 있도록 하였다. (2,1)에는 현재 구분된 블록을 3차원 공간상에서 표시하였으며, (2,2)의 영역에서는 사용자에게 의한 추가 분석을 수행하도

록 하였다.

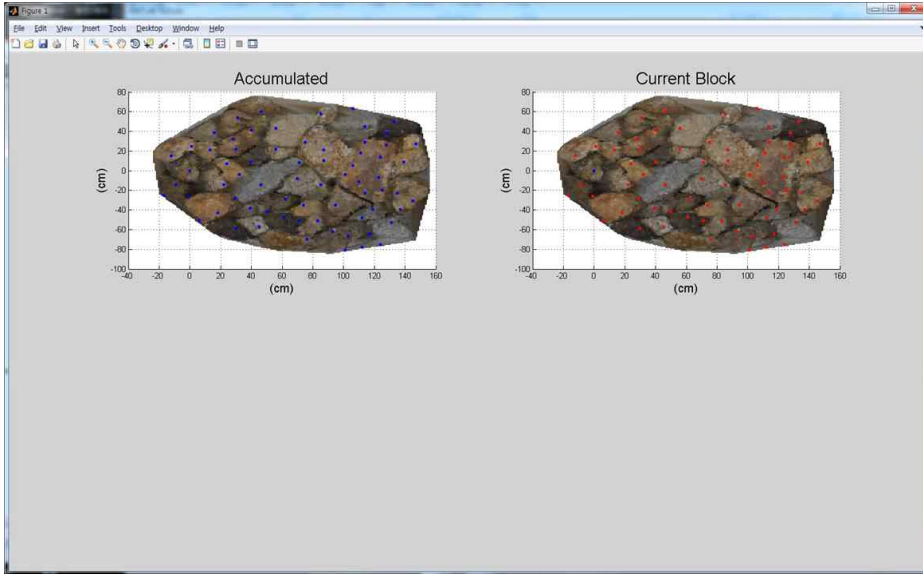
그림 5.2는 블록 분할 알고리즘을 수행한 예시 자료를 나타낸다. 그림 5.2와 같이 암석의 색상 정보가 다양하여 평면도를 통해서도 쉽게 블록의 구분이 가능한 경우도 있으나, 전체적인 암석의 색상 정보가 비슷한 경우에는 결과 그래프의 (1,2) 위치에서 블록이 적절히 구분되고 있는지 확인하기 어려운 경우가 존재하였다. 따라서 결과 그래프의 (2,1)의 위치에 현재 구분된 블록을 3차원 공간상에서 도시함으로써 블록의 확인이 보다 쉽게 이루어지도록 하였다. 블록 분할 알고리즘이 실행되면, 그림 5.2(a)에서와 같이 해석 영상의 평면도와 전처리 단계에서 검출된 피크 자료들이 함께 도시되며, 이후 블록 구분을 수행하여 그림 5.2(b)와 같이 현재 검출된 블록을 표시한다. 그림 5.2(c)는 현재 검출된 블록과 블록의 누적 상황을 함께 표시하고 있는 그림이며, 이를 통하여 분할 작업이 끝난 블록과 아직 분할되지 않은 블록들의 상황을 알 수 있도록 하였다. 또한 블록 분할 알고리즘에서, 블록의 구분이 이루어지면 해당 블록 내에 포함되는 다른 피크 자료를 제거함으로써 중복 검사가 이루어지지 않도록 하였음을 설명하였다. 그림 5.2(c)와 같이, (1,2) 영역의 블록이 구분되면 해당 영역 내에 포함되는 다른 피크 자료를 제거하여 중복 수행이 이루어지지 않도록 하였다. 마지막으로 그림 5.2(d)에서 (2,2)의 영역은 사용자에게 의한 추가 분석을 나타낸다. 블록 찾기 알고리즘에 의한 자동 블록 분할이 끝나면, 선택적으로 추가 수행이 가능하도록 하였으며, 추가 수행을 선택하면 그림 5.2(d)와 같이 마우스에 의한 경계 입력 화면이 나타난다. 사용자가 마우스를 통하여 블록의 경계를 입력하면 그림 4.28과 같은 과정을 통하여 입력 경계 내의 자료를 찾고, 이후 그림 4.29의 과정을 통하여 블록을 구분하게 된다. 구분된 블록은 이전과 동일하게 (2,1)의 영역에 표시하였다.



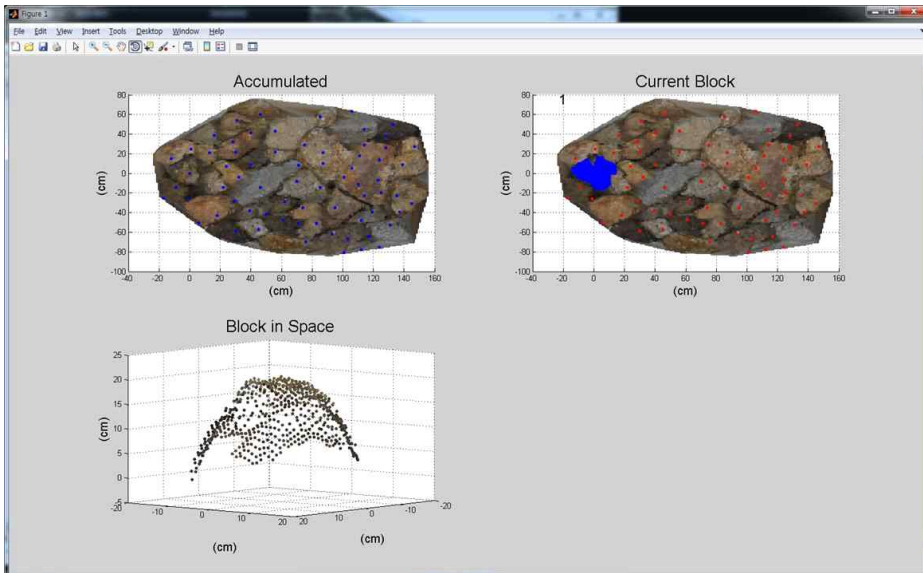
<b>Accumulated (1,1)</b>	<b>Current Block (1,2)</b>
<b>Block in Space (2,1)</b>	<b>Additional Operation (2,2)</b>

Fig. 5.1 Description of the Block Delineation Algorithm result

첫 번째 평면배치 자료의 경우, 블록 분할 알고리즘을 통하여 40개의 블록이 구분되었다. 이 중, 피크의 위치로 인하여 비슷한 영역을 중복으로 검사한 자료 및 블록이 잘못 구분된 자료가 6개였으며, 블록이 잘못 구분된 영역 및 처음부터 검사가 수행되지 않은 영역에 대하여 총 5개의 블록을 추가 작업을 통하여 구분하였다. 두 번째 평면배치 자료의 경우, 총 41개의 블록이 블록 분할 알고리즘을 통하여 검출되었으며, 이 중 중복 및 잘못 검사된 자료의 수는 5개였다. 블록 검출이 제대로 이루어지지 않은 영역과 처음부터 검사가 수행되지 않은 영역에 대하여 총 3개의 자료를 추가 작업을 통하여 분석하였다.

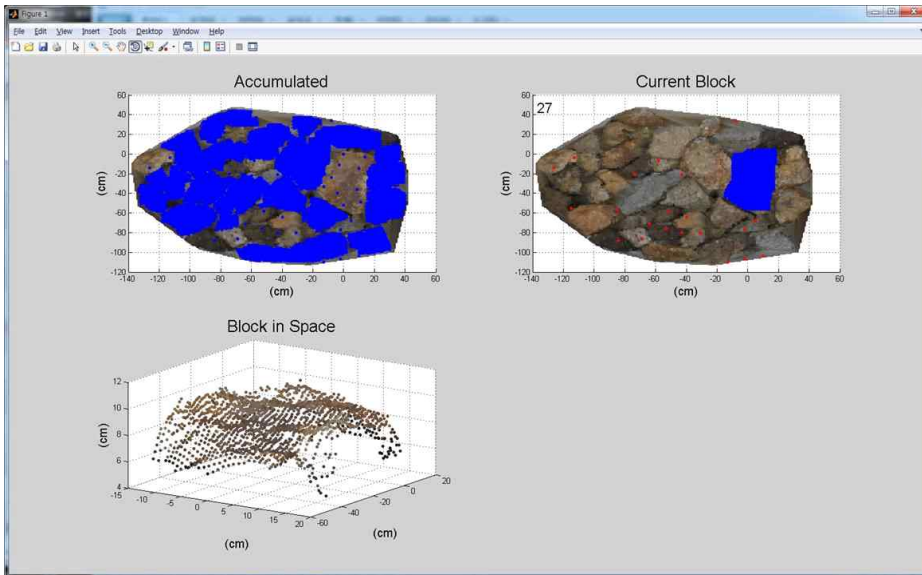


(a) First step with peak detection

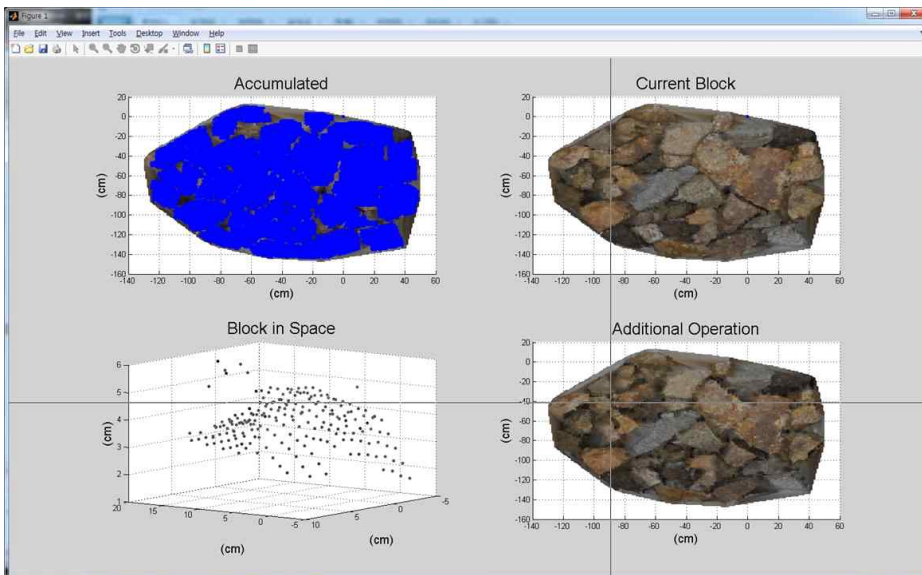


(b) Delineated block in the current step

Fig. 5.2 Example image of the Block Delineation Algorithm results



(c) Accumulated blocks along with the current block



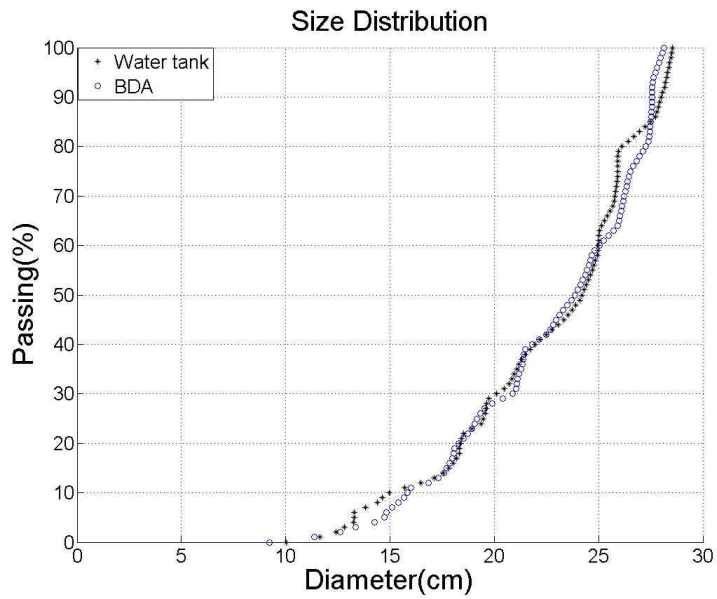
(d) Additional operation

Fig. 5.2 Example image of the Block Delineation Algorithm results  
(Continued)

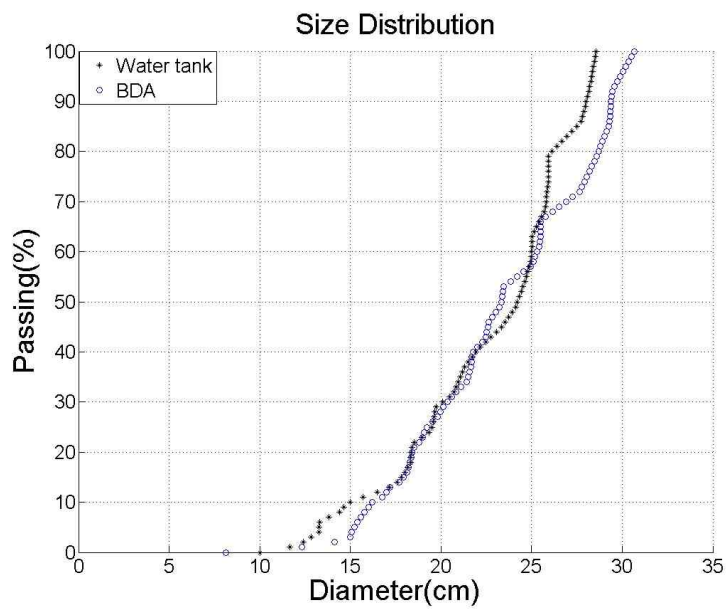
표 5.1은 블록 분할 알고리즘(Block Delineation Algorithm, BDA) 적용 결과를 나타내며, 그림 5.3은 블록 분할 알고리즘을 통하여 분석한 파쇄암의 입도 분포 곡선이다. 분석 결과, Case 1의 경우, 블록 분할 알고리즘과 수조를 이용하여 측정된 결과와의 최대 직경 차이는 1.55cm로 약 12%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{50}$ ) 차이는 0.33cm로 약 1%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 0.44cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 2%의 오차를 보였다. Case 2의 경우, BDA와 수조를 이용하여 측정된 결과와의 최대 직경 차이는 2.64cm로 약 10%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경 차이는 0.87cm로 약 4%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 0.96cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 4%의 오차를 보였다.

Table 5.1 Errors between the water tank measurement and the BDA for scattered blocks

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )		Error at $D_{50}$ ( cm / % )		Mean Error ( cm / % )	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
6	1.55 / 12	-	-	-	0.44 / 2	0.96 / 4
50	-	-	0.33 / 1	0.87 / 4		
79	-	2.64 / 10	-	-		



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 5.3 Size distributions from the water tank measurement and the BDA for scattered blocks

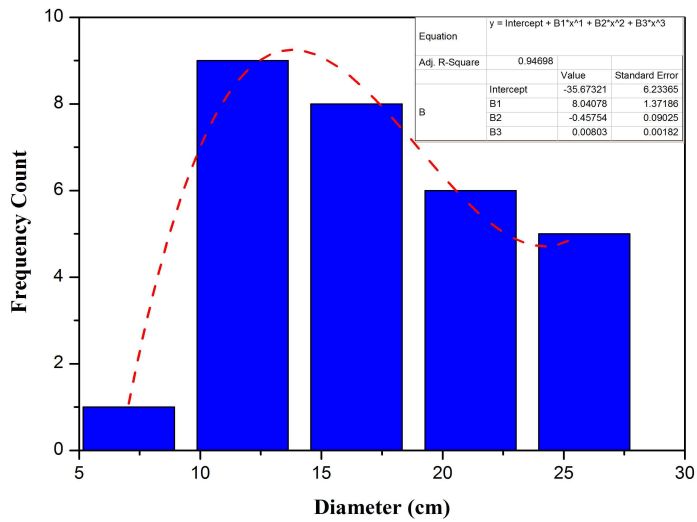
## 5.2 더미배치에 대한 적용

4.1.3절에서 언급한 바와 같이 더미배치 자료에 대해서는, 더미 외측으로 보이는 블록들의 정보를 분석한 후 이를 바탕으로 하여 통계적 추정을 수행하였다. 우선 실내 더미배치 자료에 대하여 블록 분할 알고리즘 및 통계적 추정 기술을 적용한 후, 현장 파쇄암 자료에 최종 적용하였다. 또한 블록 분할 알고리즘을 이용하여 분석한 직경에 15%의 보정을 더한 후 더미 외측 블록의 정보를 분석하였다.

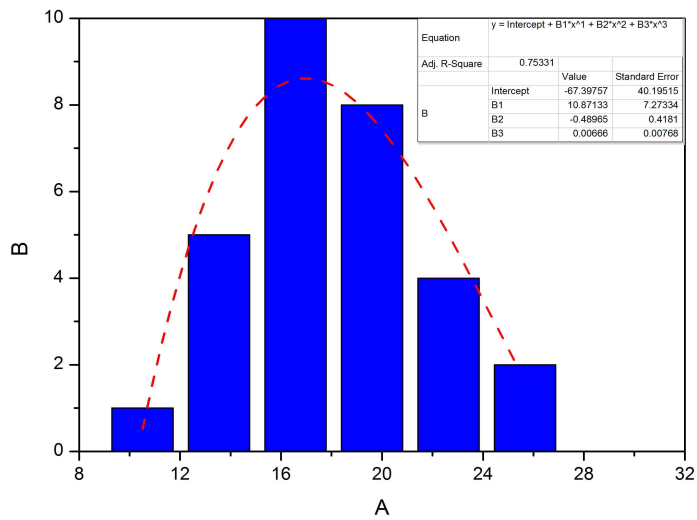
더미배치 모델링에서 더미 외측 블록에 대한 모델링 작업 시 4.1.4절에서 언급한 바와 같이, 2방향 이상에서 확인되지 않는 자료는 입력 자료에서 제외하였다. 즉, 육안으로 직접적인 확인 작업을 통해 모델링 방향 정보가 부족하다고 판단되는 자료는 입력 자료에서 제외하였다. 그러나 블록 분할 알고리즘을 통한 해석에서는, 알고리즘의 블록 해석 능력을 분석하기 위하여 이러한 자료들을 임의로 제거하지 않았으며, 확실하게 블록이 아닌 것으로 판단되는 자료 이외의 자료들은 모두 결과에 포함시켰다. 이러한 이유로, 더미배치에 대한 실내 및 현장 파쇄암 분석에서, 육안을 통하여 직접적으로 확인한 외측 블록의 자료수와 블록 분할 알고리즘을 이용하여 구분된 블록의 수에 차이가 있었다.

실내의 파쇄암에 대한 해석 중 더미배치 Case 1에 대한 블록 분할 알고리즘 적용 결과, 총 25개의 블록이 구분되었다. 이 중 6개의 블록 정보가 잘못된 것으로 확인되었으며, 추가 작업을 통하여 10개의 블록을 구분하였다. 총 블록들에 대한 직경 분석 결과, 더미 외측 블록의 최소 직경은 9.02cm, 최대 직경은 31.96cm로 나타났으며, 더미 외측 직경의 분포는 그림 5.4(a)와 같이 대수직경분포를 따르는 것으로 분석되었다. 더미 외측 블록들에 대한 평균 직경은 20.19cm, 분산은 6.06cm로 분석되었으

며, 이를 입력 자료로 하여 통계 추정을 수행하였다. 분석 결과, 통합 알고리즘과 수조를 이용하여 측정한 결과와의 최대 직경 차이는 3.45cm로 약 12%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{20}$ ) 차이는 0.81cm로 약 3%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 0.91cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 4%의 오차를 보였다. Case 2에 대한 블록 분할 알고리즘 적용 결과, 총 25개의 블록이 구분되었다. 이 중 4개의 블록 정보가 잘못된 것으로 확인되었으며, 추가 작업을 통하여 9개의 블록을 구분하였다. 총 블록들에 대한 직경 분석 결과, 더미 외측 블록의 최소 직경은 11.17cm, 최대 직경은 29.33cm로 분석되었다. 더미 외측 직경의 분포는 그림 5.4(b)와 같이 대수직경분포를 따르는 것으로 분석되었으며, 더미 외측 블록들의 평균 직경은 20.57cm, 분산은 4.39cm로 분석되었다. 통합 알고리즘과 수조를 이용하여 측정한 결과와의 최대 직경 차이는 2.93cm로 약 22%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{20}$ ) 차이는 1.86cm로 약 8%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 0.99cm로, 백분율로 나타내었을 때 약 5%의 오차를 보였다. 그림 5.5는 실내 더미배치에 대한 입도 분포 해석 자료이며, 표 5.2는 이에 대한 분석 결과이다.



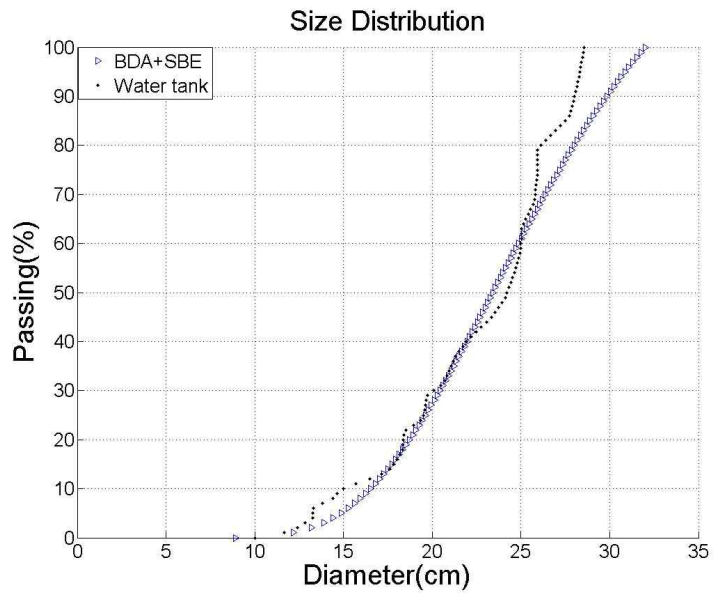
(a) Case 1



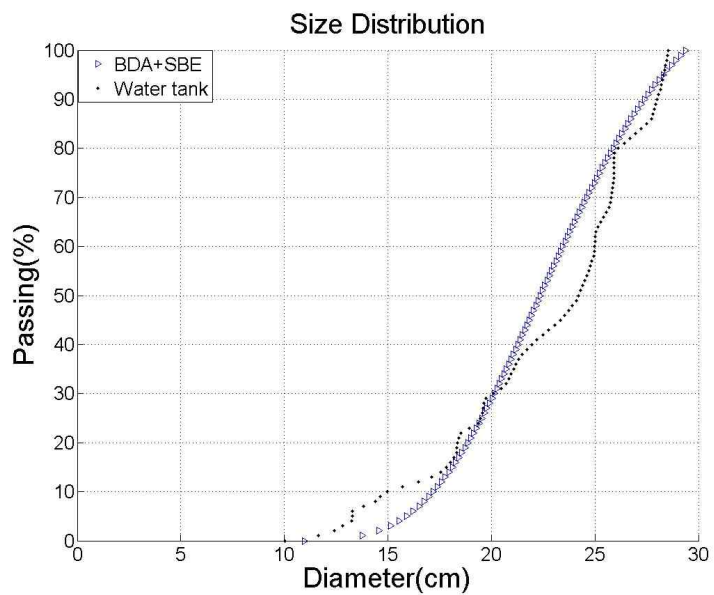
(b) Case 2

Fig. 5.4 Frequency count of surface blocks analyzed with the BDA for heaped blocks





(a) Case 1



(b) Case 2

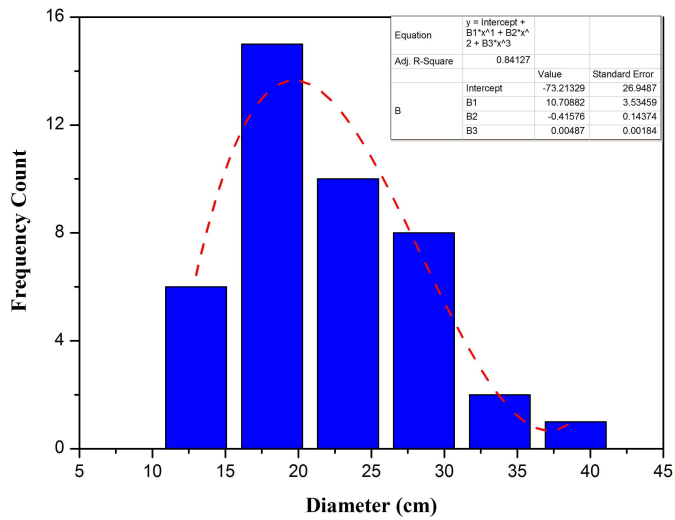
Fig. 5.5 Size distributions from the integrated algorithm and the water tank measurement for heaped blocks

Table 5.2 Errors between the integrated algorithm and the water tank measurement for heaped blocks

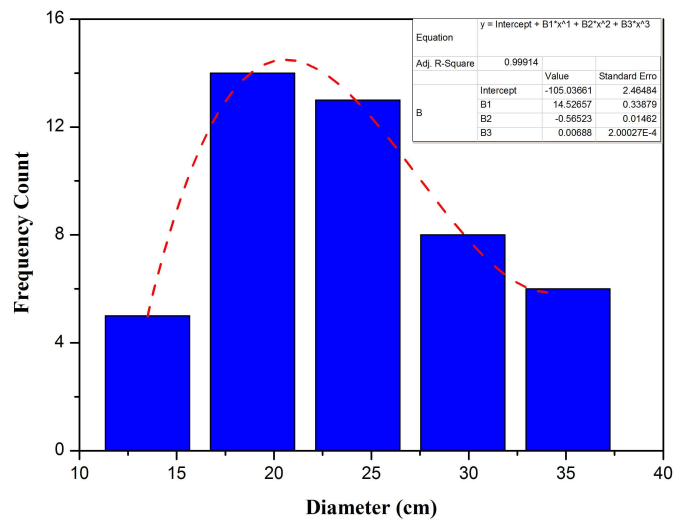
Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )		Error at $D_{50}$ ( cm / % )		Mean Error ( cm / % )	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
6	-	2.93 / 22	-	-	0.91 / 4	0.99 / 5
50	-	-	0.81 / 3	1.86 / 8		
100	3.45 / 12	-	-	-		

현장 파쇄도 분석 중 Field 1에 대한 블록 분할 알고리즘 적용 결과, 총 38개의 블록이 구분되었다. 이 중 10개의 블록 정보가 잘못된 것으로 확인되었으며, 추가 작업을 통하여 14개의 블록을 구분하였다. 총 블록들에 대한 직경 분석 결과, 더미 외측 블록의 최소 직경은 12.11cm, 최대 직경은 44.42cm로 나타났으며, 더미 외측 직경의 분포는 그림 5.6(a)와 같이 대수직경분포를 따르는 것으로 분석되었다. 더미 외측 블록들의 평균 직경은 25.17cm, 분산은 7.30cm로 분석되었으며, 이를 입력 자료로 하여 통계 추정을 수행하였다. 분석 결과, 통합 알고리즘과 PhotoModeler Scanner(PMS)를 이용하여 분석한 결과와의 최대 직경 차이는 9.37cm로 약 19%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{20}$ ) 차이는 0.01cm로 1% 내의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 2.71cm로 분석되었으며, 백분율로 나타내었을 때 약 7%의 오차를 보였다. Field 2에 대한 블록 분할 알고리즘 적용 결과, 총 42개의 블록이 구분되었다. 이 중 11개의 블록 정보가 잘못된 것으로 확인되었으며, 추가 작업을 통하여 15개의 블록을 구분하였다. 총 블록들에 대한 직경 분석 결과, 더미 외측 블록의

최소 직경은 15.51cm, 최대 직경은 42.58cm로 분석되었다. 더미 외측 직경의 분포는 그림 5.6(b)와 같이 대수직경분포를 따르는 것으로 분석되었으며, 더미 외측 블록들의 평균 직경은 27.68cm, 분산은 7.48cm로 분석되었다. 통합 알고리즘과 PMS를 이용하여 분석한 결과와의 최대 직경 차이는 3.77cm로 약 11%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{20}$ ) 차이는 0.94cm로 약 3%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 1.76cm로, 백분율로 나타내었을 때 약 6%의 오차를 보였다. Field 3에 대한 블록 분할 알고리즘 적용 결과, 총 55개의 블록이 구분되었다. 이 중 19개의 블록 정보가 잘못된 것으로 확인되었으며, 추가 작업을 통하여 8개의 블록을 구분하였다. 총 블록들에 대한 직경 분석 결과, 더미 외측 블록의 최소 직경은 11.15cm, 최대 직경은 38.33cm로 분석되었다. 더미 외측 직경의 분포는 그림 5.6(c)와 같이 대수직경분포를 따르는 것으로 분석되었으며, 더미 외측 블록들의 평균 직경은 24.27cm, 분산은 6.63cm로 분석되었다. 통합 알고리즘과 PMS를 이용하여 분석한 결과와의 최대 직경 차이는 3.96cm로 약 13%, 통과율 50%에서의 파쇄 직경( $D_{20}$ ) 차이는 2.62cm로 약 10%의 오차를 보였다. 전 구간에 대한 평균 직경 차이는 2.41cm로, 백분율로 나타내었을 때 약 9%의 오차를 보였다. 그림 5.7은 현장 파쇄 더미에 대한 입도 분포 해석 자료이며, 표 5.3, 5.4와 5.5는 이에 대한 분석 결과이다.

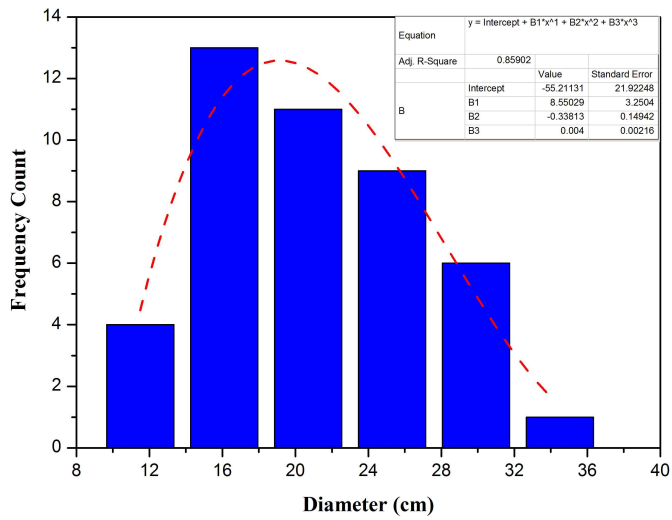


(a) Field 1



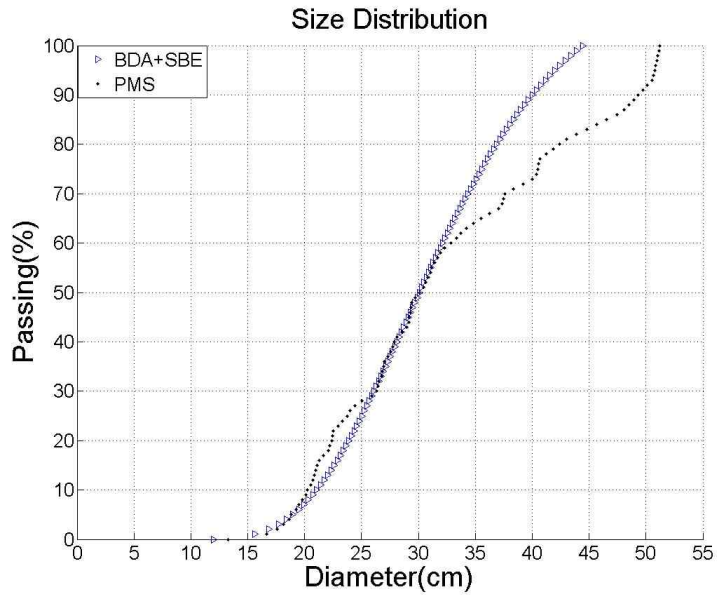
(b) Field 2

Fig. 5.6 Frequency count of surface blocks analyzed with the BDA for a muckpile in the field

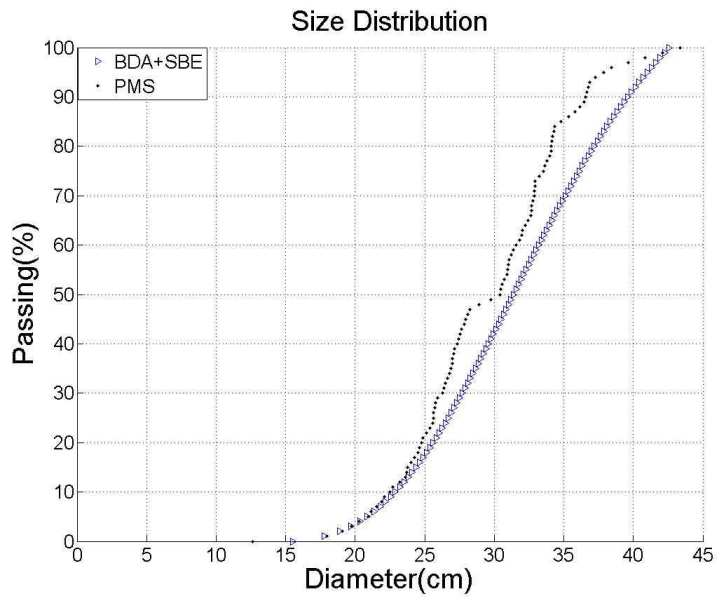


(c) Field 3

Fig. 5.6 Frequency count of surface blocks analyzed with the BDA for a muckpile in the field (Continued)

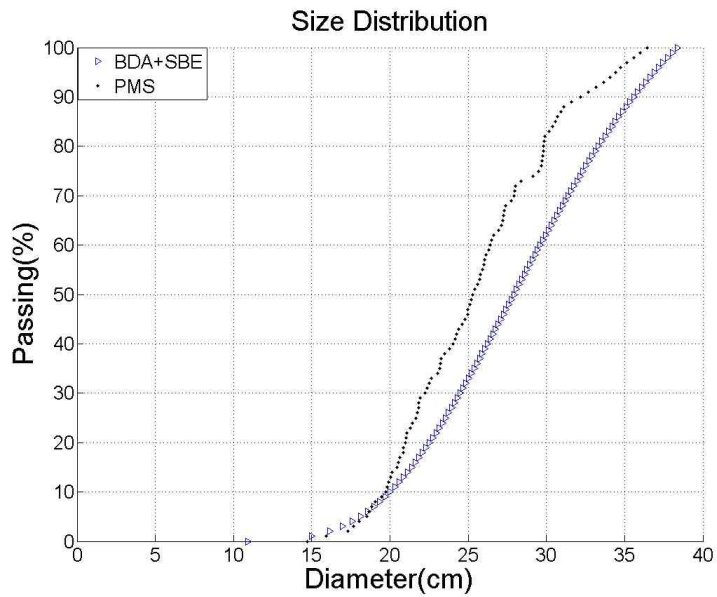


(a) Field 1



(b) Field 2

Fig. 5.7 Size distributions from the integrated algorithm and the PhotoModeler Scanner analysis for a muckpile in the field



(c) Field 3

Fig. 5.7 Size distributions from the integrated algorithm and the PhotoModeler Scanner analysis for a muckpile in the field (Continued)

Table 5.3 Errors between the integrated algorithm and the PhotoModeler  
Scanner analysis: Field 1

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )	Error at $D_{50}$ ( cm / % )	Mean Error ( cm / % )
50	-	0.01 / <1	2.71 / 7
93	9.37 / 19	-	

Table 5.4 Errors between the integrated algorithm and the PhotoModeler  
Scanner analysis: Field 2

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )	Error at $D_{50}$ ( cm / % )	Mean Error ( cm / % )
50	-	0.94 / 3	1.76 / 6
84	3.77 / 11	-	

Table 5.5 Errors between the integrated algorithm and the PhotoModeler  
Scanner analysis: Field 3

Passing (%)	Maximum Error ( cm / % )	Error at $D_{50}$ ( cm / % )	Mean Error ( cm / % )
50	-	2.62 / 10	2.41 / 9
88	3.96 / 13	-	



### 5.3 평가 결과 고찰

영상을 이용한 분석에서, 영상 내 관심 대상에 대한 정보 분석은 인간이 육안으로 판단하는 것이 가장 정확하다고 할 수 있다. 파쇄도 분석을 위한 이 연구에서도 3장과 4장의 결과에서 보듯이, 암석 블록을 육안으로 정확히 구분해내고 이러한 정보를 이용한 결과가 더 우수함을 확인할 수 있었다. 그러나 작업자의 능률 및 속도를 고려한다면 2차원 파쇄도 분석 프로그램인 Split Desktop과 같은 자동 해석 프로그램을 이용하는 것이 도움이 된다. 이러한 파쇄도 분석 자동화를 목적으로, 이 연구에서는 암석 블록의 3차원 형상 특성을 통해 블록을 구분하는 알고리즘을 개발하였다. 이 연구에서 수집한 실내 및 현장 파쇄 더미의 형상 특성을 고려하여, 공통점이라고 생각되는 요소들을 분석한 후, 이를 기초로 전체 파쇄 더미로부터 개별 파쇄암을 구분하는 알고리즘을 개발하였다. 그러나 암석 형상의 다양성 및 불규칙성을 고려할 때, 모든 암석 블록을 완벽하게 구분할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것은 매우 어려운 작업이라고 판단되며, 따라서 이 연구에서 개발한 블록 분할 알고리즘이 모든 암석 형상에 대하여 적용 가능하다고는 할 수 없다. 분석 결과에서도 보듯이, 이 연구에서 개발한 알고리즘으로 블록 분할을 수행하는 경우, 블록 영역의 구분이 잘 이루어지지 않는 경우에는 결과에 다소 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

블록 분할 알고리즘의 블록 검출률을 표 5.6에 나타내었다. 분석 결과, 평면배치에서는 약 90% 내외의 검출률을 보였으며, 더미배치에 대해서는 전체적으로 약 70% 내외의 검출률을 갖는 것으로 분석되었다. 평면배치에서는 블록들 사이의 경계가 더미배치에 비하여 분명하였으므로, 블록 분할 알고리즘을 통하여 대부분의 블록을 구분해 낼 수 있었다. 반

면, 더미배치에서는 평면배치의 결과와 비교하여 검출률이 다소 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 배치 형태로 인해 인접한 블록들 사이의 경계가 분명하지 못한 경우 블록 분할 알고리즘이 이를 구분하지 못하기 때문인 것으로 분석되었다.

블록 분할 수행에 앞서, 전체 점군 자료를  $x-y$  방향으로 1의 간격을 갖도록 자료를 재구성하였으며, 이후 암석 블록은, 가로 1, 세로 1, 높이  $z$ 를 갖는 직육면체의 조합으로 이루어지는 것으로 가정하였다. 수조를 이용하여 측정한 부피와 PhotoModeler Scanner를 이용하여 분석한 부피, 이 연구에서의 부피 산정 방식에 따라 계산된 부피 결과에는 약간의 차이가 존재하였으나, 최종 분석 결과에서 보듯이, 실내의 파쇄암에 대한 분석에서는 평균적으로 1cm 내외의 오차, 현장의 파쇄 더미에 대한 분석에서는 평균적으로 3cm 내외의 오차를 보임을 확인할 수 있었다. 첫 번째 동해 현장의 경우와 같이 최대 오차가 10cm 정도 발생했던 부분은, 부피 산정 방식의 영향이 아니라 블록 분할 알고리즘이 구분해 낸 블록의 영역 때문인 것으로 분석되었다. 전체적으로 상기 부피 산정 방식의 영향이 결과에 미치는 영향이 적은 이유는, 직경 산정 시 식 (3.3)과 같이, 부피에 대한 세제곱근을 이용하기 때문인 것으로 판단된다.

이 연구에서 개발한 블록 분할 알고리즘은, 전체 더미에서 피크라고 판단되는 점들을 검출하고 이 점들을 기준으로 블록 분할을 수행하고 있다. 따라서 피크가 너무 많이 검출되었을 때 블록이 제대로 구분되지 않는 경우, 동일 블록 혹은 비슷한 영역에 대한 중복 검사의 영향으로 전체적인 알고리즘의 수행 시간이 길어지는 단점이 있다. 따라서 알고리즘 전처리부에서 설명한 바와 같이, 피크 검출 기준 영역의 크기를 적절히 설정하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

마지막으로 이 연구에서는 영상의 색상 정보를 고려하지 않았다. 육안

으로 판단하는 경우에는, 동일 물체에 그림자 등의 음영이 지더라도 대부분의 경우 인간이 이를 인지할 수 있다. 그러나 이러한 부분에서는 영상의 색상 정보가 급격하게 변화하므로 컴퓨터를 이용한 해석이 반드시 도움이 된다고는 할 수 없다. 또한 현장 중 동해의 파쇄 더미 자료와 같이 비슷한 색상 정보의 물체들이 인접하고 있을 때 빛이 물체들의 경계에 비치게 되면, 전 영역에 걸쳐 색상 정보의 급격한 변화가 감지되지 않으므로 모두 동일 물체인 것으로 분석될 수 있다. 이러한 이유로 이 연구에서는 대상의 3차원 좌표 정보만을 이용한 알고리즘을 개발하였다.

Table 5.6 Delineated rate using the Block Delineation Algorithm

Experiments		Scattered blocks			Heaped blocks		
		Delineated	Additional	Rate (%)	Delineated	Additional	Rate (%)
Laboratory	Case 1	34	5	87	19	10	66
	Case 2	36	3	92	21	9	70
Field 1		-			28	14	67
Field 2					31	15	67
Field 3					36	8	82

## 6. 결론

이 연구에서는 입체사진측량기법을 이용하여 암석의 파쇄도를 분석하였다. 실내 파쇄도 분석을 통해 평면배치에서의 분석 및 더미배치에서의 통계 추정을 수행하였고, 이 과정을 현장에 적용하여 입체사진측량기법을 통한 암석의 파쇄도 분석의 적용성을 확인하였다. 또한 파쇄 더미의 3차원 좌표 정보를 이용하여 파쇄암 블록을 구분하는 알고리즘을 개발하여 상기 통계 추정 기술과 통합한 분석을 수행하였다. 이 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 3차원 모델링에 기반한 입체사진측량기법을 이용하여 암석 블록에 대한 모델링을 수행하였고 2차원 영상처리기법을 이용한 결과와 비교하여 정확도가 향상된 결과를 얻을 수 있었다. 입체적으로 취득한 영상에 대하여 암석의 형상 정보를 공간적으로 활용함으로써 신뢰도가 향상된 결과를 얻을 수 있었다.
2. 2차원 영상처리를 이용한 해석의 경우 암석의 형상에 따른 오차 요인을 확인하였다. 평면적인 형상을 가지는 암석의 경우 2차원 정보를 3차원으로 활용함으로써 직경이 커질수록 오차가 크게 발생함을 확인할 수 있었다.
3. 입체사진측량기법을 이용한 암석 모델링 시 암석의 정보가 제한적으로 이용된 자료를 통계 추정을 위한 입력 자료에서 제외함으로써 해석 결과를 향상시킬 수 있었다. 또한 더미 외측 블록에 대한 직경 정보를 토대로 통계 추정을 위한 상/하한값을 설정함으로써 실제 분포

와 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 현장 파쇄암에 대한 자료 분석 시, 최대 및 최소 직경에 대한 자료 분석 범위를 사전에 정확히 설정하여 이를 3차원 모델링 및 통계 추정을 위한 자료로 활용한다면 실제 현장의 파쇄도를 반영한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 더미배치 형태의 파쇄암에 대한 입도 분포 분석 시 더미배치 형태로 인해 더미 외측 블록에 대한 정보가 100% 활용되지 못하는 현상이 발생하게 된다. 따라서 이 연구에서는 이러한 문제를 보완하기 위하여, 실제 파쇄암 자료와 더미 외측 블록에 대한 직경 정보를 비교/분석하고 이를 토대로 더미 외측 블록에 대한 보정량을 산정하였다. 다만, 이러한 보정 수치는 현장이나 배치 형태에 따라 달라질 수 있으므로, 보다 많은 수의 사례 분석을 통하여 필요 보정량의 정확도를 향상시켜야 할 것으로 판단된다.
5. 더미배치 형태의 파쇄암에 대하여, 입체사진측량 및 더미 외측 블록 정보를 이용한 통계적 파쇄도 추정 가능성을 확인하였다. 실내 및 현장 파쇄 더미에 대한 분석에서 평균적으로 5% 이내의 오차를 보이는 것으로 분석되었으며, 이를 통하여 판단할 때, 이 연구에서 수행한 입체사진측량 및 더미 외측 블록 정보를 이용한 통계 추정을 통해 기존의 2차원 영상처리기법을 이용한 파쇄도 분석과 비교하여 보다 현장 적용성이 높은 자료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

6. 블록 분할 알고리즘을 적용하여 블록을 검출한 결과, 평면적으로 배치된 경우에는 약 90% 내외, 더미배치에서는 약 70% 내외의 성능으로 블록을 검출할 수 있었다. 이후 사용자 입력에 의한 블록 분석을 통해 최종적으로 블록 정보를 통합하고 이를 이용하여 해석을 수행하였다. 분석 결과, 실내와 현장 파쇄암 모두에서 평균적으로 5% 내외의 오차 수준 성능을 보였으나, Field 1의 경우에서와 같이 블록 경계를 정확히 인식하지 못한 경우에는 오차가 다소 크게 발생하였다. 이 연구에서 개발한 알고리즘만으로 모든 형상과 배치형태에 대하여 파쇄암을 분석하기에는 한계가 있으므로, 보다 다양한 블록 형상을 인지할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 진행된다면 이러한 부분에 대한 보완이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.
  
7. 실제 현장에서는 그 부피 및 중량이 큰 파쇄암이 파쇄 더미 하부에 존재하고 부피 및 중량이 작은 파쇄암일수록 파쇄 더미 상부에 위치하게 될 가능성이 높다. 이를 통하여 볼 때, 파쇄 더미 하부에 존재하는 파쇄암일수록 상부 파쇄암에 의해 가려진 부분이 많아 부피가 과소평가될 확률이 높다고 할 수 있다. 따라서 파쇄 더미 하부에 존재하는 부피가 큰 파쇄암에 대한 정보를 보다 정확히 분석하기 위한 연구가 수행된다면 실제 현장의 정보를 보다 정확히 반영한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

공달용, 임종덕, 김정률, 김경수, 2010, 남해 가인리 공룡발자국 화석에 대한 디지털 사진 측량 기법의 활용, 한국지구과학회지, 제 31권 2호, pp. 129-138.

김종훈, 2002, 암반 절리의 기하학적 특성 분석을 위한 디지털 사진측량 기법의 개발, 공학박사학위논문, 강원대학교 대학원.

류동우, 이유리, 장윤섭, 이희근, 박형동, 2000, 화상처리 및 입체사진측량학을 이용한 암반 절리 조사 시스템, 터널과 지하공간, 제 10권, pp. 329-343.

박명일, 2003, 상부하중과 사면형태에 따른 굴착면의 요철 및 파쇄도에 관한 연구, 공학석사학위논문, 전북대학교 대학원.

서현교, 엄정기, 2012, 디지털 사진측량에 의한 암석의 절리면 거칠기 측정에 관한 연구, 터널과 지하공간, 제 22권 6호, pp. 438-448.

석태용, 2007, 인공신경망을 이용한 터널의 변형률 예측기법, 공학박사학위논문, 경북대학교 대학원.

선우춘, 류창하, 최병희, 2001, 영상처리기법에 의한 발파파쇄암의 파쇄도 측정, 화약발파학회지, 제 2권, pp. 5-18.



유복모, 김원대, 1999, 수치사진측량을 이용한 지형공간정보 추출, 한국지형공간정보학회지, 제 7권 2호, pp. 81-91.

이상용, 1996, 액체의 미립화, 민음사.

임상균, 2000, 손등 정맥패턴 추출알고리즘 개발과 이를 이용한 생체인식 시스템 구현, 공학박사학위논문, 고려대학교 대학원.

임영빈, 이국무, 배상호, 1999, 문화재 보존을 위한 정밀 3차원 모니터링, 한국지형공간정보학회지, 제 7권 1호, pp. 65-74.

장호식, 2005, 디지털 비디오카메라를 이용한 도로노면정보 추출, 한국측량학회지, 제 23권 1호, pp. 9-17.

전석원, 송재준, 이상돈, 방상혁, 이창수, 조성우, 2006, 절취사면에 대한 DB 구축 및 붕괴 예측기법 개발, 소방방재청 보고서.

정성혁, 박경식, 이계동, 이재기, 2003, 상용 디지털카메라에 의한 3차원 측정의 정확도 분석, 한국측량학회 추계학술발표회 논문집, pp. 153-156.

정영준, 2002, 천공패턴과 암반조건 변화가 파쇄도와 진동수준에 미치는 영향 연구, 공학석사학위논문, 전남대학교 대학원.

최용근, 2005, 벤치발파에서 암석 파쇄도에 영향을 미치는 요인 분석과 파쇄도 예측 모델 개발, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.

한공창, 선우춘, 류창하, 김인기, 김인균, 홍기표, 송원경, 최병희, 1997, 채석 및 석재가공 기술연구 2, 한국지질자원연구원 보고서.

한정훈, 송재준, 조영도, 2011, 입체사진측량기법을 이용한 파쇄도 추정, 터널과 지하공간, 제 21권 1호, pp. 83-93.

한학용, 1999, 패턴인식 개론, 한빛미디어.

홍창우, 2006, 유전알고리즘을 이용한 암반 등급의 지구통계학적 최적 분포 예측, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.

Al-Thyabat S., Miles N.J., Koh T.S., 2007, Estimation of the Size Distribution of Particles moving on a Conveyor Belt, Minerals Engineering, Vol. 20, pp. 72-83.

Anusuya M.A., Katti S.K., 2009, Speech Recognition by Machine, International Journal of Computer Science & Information Security, Vol. 6, No. 3, pp. 181-205.

Bannayan M., Hoogenboom G., 2008, A Tool for Real-Time Prediction of Daily Weather Data Realizations Based on a Modified k-nearest Neighbor Approach, Environmental Modelling & Software, Vol. 23, pp. 703-713.

Chen S., Yue Z.Q., Tham L.G., 2004, Digital Image-based Numerical Modeling Method for Prediction of Inhomogeneous Rock Failure, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 41, pp. 939-957.

Cunningham C.V.B., 1996, Optical Fragmentation Assessment, Proceedings of the Fragblast-5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, pp. 13-19.

Firpo G., Salvini R., Francioni M., Ranjith P.G., 2011, Use of Digital Terrestrial Photogrammetry in Rocky Slope Stability Analysis by Distinct Elements Numerical Methods, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 48, pp. 1045-1054.

Girdner K.K., Kemeny J.M., Srikant A., McGill R., 1996, The Split System for Analyzing the Size Distribution of Fragmented Rock, Proceedings of the Fragblast-5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, pp. 101-108.

Hagan T.O., 1980, A Case for Terrestrial Photogrammetry in Deep-mine Rock Structure Studies, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 17, No. 4, pp. 191-198.

Han J.H., Song J.J., Statistical Estimation of Blast Fragmentation by applying Stereophotogrammetry to Block Piles, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 68, pp. 150-158.

Karl K., 2007, Photogrammetry, Walter de Gruyter.

Kemeny J., Mofya E., Kaunda R., Lever P., 2001, Improvements in Blast Fragmentation Models using Digital Image Processing, Proceedings of the 38<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp. 213-216.

Kleine T.H., Cameron A.R., 1996, Blast Fragmentation Measurement using GoldSize, Proceedings of the Fragblast-5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, pp. 83-89.

Likforman-Sulem L., Sigelle M., 2008, Recognition of Degraded Characters using Dynamic Bayesian Networks, Pattern Recognition, Vol. 41, pp. 3092-3103.

Liu Q., Tran H., 1996, Validation of FragScan, WipFrag, Split, Proceedings of the Fragblast-5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, pp. 151-155.

Maclachlan R.R., Singh A., 1989, Photographic Determination of Oversize Particles in Heaps of Blasted Rock, Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy, Vol. 89, No. 5, pp. 147-152.

Maerz N.H., Franklin J.A., Rothenburg L., Coursen D.L., 1987, Measurement of Rock Fragmentation by Digital Photoanalysis, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Society for Rock Mechanics Congress, pp. 687-692

Maerz N.H., Palangio T.C., Franklin J.A., 1996, WipFrag Image Based Granulometry System, Proceedings of the Fragblast-5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, pp. 91-99.

Maerz N.H., Zhou W., 1998, Optical Digital Fragmentation Measuring Systems, International Journal for Blasting & Fragmentation, Vol. 2, No. 4, pp. 415-431.

McAndrew A., Wang J.H., Tseng C.S., 2010, Introduction to Digital Image Processing with Matlab, Cengage Learning.

Müller B., Hausmann J., Niedzwiedz H., 2009, Control of Rock Fragmentation and Muck Pile Geometry during Production Blasts, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting: Fragblast 9, pp. 277-286.

Noy M.J., 2006, The Latest in on-line Fragmentation Measurement - Stereo Imaging over a Conveyor, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting: Fragblast 8, pp. 61-66.

Ohnishi Y., Nishiyama S., Yano T., Matsuyama H., Amano K., 2006, A Study of the Application of Digital Photogrammetry to Slope Monitoring Systems, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 43, pp. 756-766.

Ozkahraman H.T., 2006, Fragmentation Assessment and Design of Blast Pattern at Goltas Limestone Quarry, Turkey, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 43, pp. 628-633.

Paul R.W., Bon A.D., 2000, Elements of Photogrammetry, McGraw-Hill.

Perwej Y., Chaturvedi A., 2011, Neural Networks for Handwritten English Alphabet Recognition, International Journal of Computer Applications, Vol. 20, No. 7, pp. 1-5.

Reid T.R., Harrison J.P., 2000, A Semi-automated Methodology for Discontinuity Trace Detection in Digital Images of Rock Mass Exposures, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 37, No. 7, pp. 1073-1089.

Richard O.D., Peter E.H., David G.S., 2001, Pattern Classification, John Wiley & Sons.

Rizk N.K., Lefebvre A.H., 1985, Drop-Size Distribution Characteristics of Spill-Return Atomizers, Journal of Propulsion & Power, Vol. 1, No. 1, pp. 16-22.

Siddiqui F.I., Ali Shah S.M., Behan M.Y., 2009, Measurement of Size Distribution of Blasted Rock using Digital Image Processing, Engineering Sciences, Vol. 20, No. 2, pp. 81-93.

Sirotyuk G.N., 1970, A Method of Calculating the Fragment-Size Composition of Blasted Rock from the Given Oversize Fragmentation Dimension, Mining-Metallurgical Institute, Vol. 1, pp. 72-79.

Sudhakar J., Adhikari G.R., Gupta R.N., 2006, Comparison of Fragmentation Measurements by Photographic and Image Analysis Techniques, *Rock Mechanics & Rock Engineering*, Vol. 39, No. 2, pp. 159-168.

Thurley M.J., 2011, Automated Online Measurement of Limestone Particle Size Distributions using 3D Range Data, *Journal of Process Control*, Vol. 21, pp. 254-262.

Tsoutrelis C.E., Exadactylos G.E., Kapenis A.P., 1990, Study of the Rock Mass Discontinuity System using Photoanalysis, *Proceedings of International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, pp. 103-112.

Valenca J., Dias-da-Costa D., Júlio E., Araújo H., Costa H., 2013, Automatic Crack Monitoring using Photogrammetry and Image Processing, *Measurement*, Vol. 46, pp. 433-441.

Van Aswegen H., Cunningham C.V.B., 1986, The Estimation of Fragmentation in Blast Muckpiles by means of Standard Photographs, *Journal of the South African Institute of Mining & Metallurgy*, Vol. 86, No. 12, pp. 469-474.

Van Breugel K., 1995, Numerical Simulation of Hydration and Microstructural Development in Hardening Cement-Based Materials, *Cement & Concrete Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 319-331.

Wang W., Li L., Hakami E., 2005, Image Analysis of Multiple Rock Fractures, Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, pp. 1272-1276.



**Abstract**

**Fragmentation Analysis**

**using 3D Block Delineation Algorithm**

Han Jeong-Hun

Department of Energy Resources Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Fragmentation analysis is the basic method for evaluating the efficiency of a blast design and the productivity of a blast. In soil mechanics, the sieve test is generally used to determine the size distribution of soil, while computer software has been used in rock engineering to determine the size of rocks due to the constraints of the rock size and the volume. Split Desktop, WipFrag and FragScan are the most popular software packages based on 2D image processing for performing a size distribution analysis of the rock blocks. 2D image processing techniques, however, only use the area and boundary information of an object to analyze an image. In addition, scattered blocks on a plane, such as a conveyor belt and a bucket, have been considered in most research studies; however, rock blocks are usually heaped, for example, a muckpile in the field. Therefore, an

estimation method designed for heaped blocks can provide prompt analysis for a muckpile in the field after a blast.

Stereophotogrammetry is the technique to extract the spatial information of an object by constructing a stereo-image from two or more photos. A higher number of geometrical features of an object can be obtained with stereophotogrammetry through reconstruction based on images taken from various directions rather than the number of features obtained using 2D image processing techniques. In this study, stereophotogrammetry based on 3D modeling was used to analyze the size distribution of rock blocks. In the laboratory experiments, results using stereophotogrammetry and the 2D image processing technique were compared with the physical measurements using a water tank for characterizing the scattered and heaped blocks. For heaped blocks, the information of the surface blocks that was analyzed by stereophotogrammetry was used as the input parameter for the statistical estimation. The applicability of stereophotogrammetry and the statistical estimation methods to the analysis of blast fragmentation was estimated through the field experiments.

The Block Delineation Algorithm (BDA) was developed to distinguish each block of the muckpile. This algorithm is based on the features that block shapes have in common. Finally, this algorithm was integrated into the statistical estimation described above to analyze blast fragmentation.

**keywords : Fragmentation analysis, 2D image processing,**

**Stereophotogrammetry, Statistical estimation, Block Delineation Algorithm**

***Student Number : 2007-30856***