



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](#)

공학석사 학위논문

쿼드트리 분할영상의 국부이진화를 통한 팩아이스 집적도 및 크기 분포도 측정 알고리즘

An algorithm for measurement of pack ice concentration and size
distribution using localized binarization of quadtree-subdivided image



2017년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

변 석 호

본 논문을 변석호의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 이 승 재 (인)

위 원 박 주 용 (인)

위 원 남 중 호 (인)



2017년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Table	iv
List of Figures	v
Abstract	viii

제 1 장 서 론

1.1 북극항로	1
1.2 쇄빙선 및 내빙선 기초연구	3
1.3 선행연구	5
1.4 개요	9

제 2 장 OpenCV 및 디지털 영상 처리

2.1 OpenCV	11
2.3 디지털 영상처리 및 활용 분야	12
2.4 디지털 영상 및 종류	12
2.5 컬러영상의 색 공간	15
2.6 영상 히스토그램	17
2.7 이진화와 임계값	18
2.8 엣지 검출 및 윤곽 추출	20
2.9 형태학 처리	22
2.10 Distance transform	23
2.11 워터셰드	24

제 3 장	팩아이스 영상 특징 및 이진화	
3.1	팩아이스 영상 특징	25
3.2	최적 임계값	25
3.3	구획화를 이용한 국부 이진화	27
제 4 장	쿼드트리 분할을 활용한 알고리즘	
4.1	쿼드트리 개념	30
4.2	개발 알고리즘	30
4.3	히스토그램 분석 및 피크 분류 (#1)	31
4.4	1피크 히스토그램 영상 분석 (#2)	33
4.5	2피크 히스토그램 영상의 필터링 수행 (#3)	36
제 5 장	개별 면적 분포도	
5.1	중첩 팩아이스 분리	38
5.2	위터셰드 개별 추출 알고리즘	39
5.3	위터셰드를 활용한 개별 팩아이스 추출 알고리즘	40
제 6 장	예제	
6.1	국부 이진화 개발 알고리즘 효과	43
6.2	국부 이진화 개발 알고리즘을 이용한 집적도 측정	45
6.3	국부 이진화 개발 알고리즘 정확도 검토	47
6.4	개별 팩아이스 추출 및 면적 분포도	47
6.5	팩아이스 집적도 및 개별 팩아이스 면적 분포도 측정 모듈	49
제 7 장	결론	53
	참고문헌	54

List of Tables

Table 1 Results of analyzed images47



List of Figures

Fig. 1 Comparison of existing route and Arctic route distance	1
Fig. 2 Variation of polar ice cap between 1979 and 2012	2
Fig. 3 Prediction of sea ice in the Arctic Ocean	2
Fig. 4 Ice model basin of KRISO	3
Fig. 5 Non-uniform pack ice digital image	3
Fig. 6 Ice model basin with pack ice	4
Fig. 7 Uniform square pack ice	5
Fig. 8 Pack ice image planned with 60% concentration	6
Fig. 9 Pack ice image planned with 80% concentration	6
Fig. 10 Measurements of pack ice concentration using a commercial image processing software	7
Fig. 11 Area distribution derived from original image	8
Fig. 12 Sensitive result change according to input value	8
Fig. 13 Comparison of results from global and local binarization of original image	9
Fig. 14 OpenCV logo	11
Fig. 15 Auto-driving system	12
Fig. 16 Augmented reality	12
Fig. 17 Analogue versus digital image	13
Fig. 18 Binary, gray level, color digital image	14
Fig. 19 Principle of additive mixing	15
Fig. 20 RGB cube model	15
Fig. 21 Conical and cylindrical models of HSV	16
Fig. 22 Color attributes of multiple color space	17
Fig. 23 Concept of image histogram	17
Fig. 24 Example of image histogram	18
Fig. 25 Principle of binarization	18
Fig. 26 Example of binarization	19
Fig. 27 Example of Rafflesian edge detection	21
Fig. 28 Original image, edge, contour	21

Fig. 29	Principle of morphology	22
Fig. 30	Principle of distance transform	23
Fig. 31	Original image and normalized distance transform result	23
Fig. 32	Principle of watershed segmentation	24
Fig. 33	Histogram of an ideal pack ice image	25
Fig. 34	Histograms of original image, ice image , and water image	26
Fig. 35	Assignment of optimal threshold for three-peak histogram	27
Fig. 36	Local binarization process using subdivision	28
Fig. 37	Comparison uncertainty area of from global and local binarization	29
Fig. 38	Comparison of results from global and local binarization	29
Fig. 39	Concept of quad-tree	30
Fig. 40	Flowchart of developed algorithm	31
Fig. 41	Effect of Gaussian blur	32
Fig. 42	Histograms of a complete peak, an incomplete peak, two complete peaks and two incomplete peaks	33
Fig. 43	Pixel map of single-peak image and extended area for comparison analysis	34
Fig. 44	Process of binarization for image of a complete peak	35
Fig. 45	Histograms of a single-peak image and an extended image which is binarized as pack ice, water	36
Fig. 46	Ambiguous histogram for binarization	37
Fig. 47	Concept of labeling	38
Fig. 48	Individual pack ice extraction by labeling	38
Fig. 49	Watershed segmentation algorithm	39
Fig. 50	Primary and secondary derivative edge of original image	40
Fig. 51	Binary image and morphology erode image	40
Fig. 52	Example of distance transform	41
Fig. 53	Original, segmentation with global binarization, with local binarization	41
Fig. 54	Seed contour extraction algorithm	42
Fig. 55	Original image and result of global binarization	43
Fig. 56	Result of developed algorithm and quadtree subdivision	44

Fig. 57 Original image, quad-tree subdivision, result of global binarization, result of developed algorithm	45
Fig. 58 Results for different pack ice images	46
Fig. 59 Example of individual pack ice extraction and area distribution chart	48
Fig. 60 Example of individual pack ice extraction and area distribution chart	48
Fig. 61 Example of individual pack ice extraction and area distribution chart	49
Fig. 62 Image editor and presetting length unit module	50
Fig. 63 Histogram, threshold analysis and global binarization module by color space ..	50
Fig. 64 Image and histogram detail analysis module depending on color space ..	50
Fig. 65 Calculation of pack ice concentration and local binarization by developed algorithm and edge detection	51
Fig. 66 Entire process Image display module	51
Fig. 67 Labeling image by individual pack ice and distribution chart output module	52



An algorithm for measurement of pack ice concentration and size distribution using localized binarization of quadtree-subdivided image and watershed

Byun, Seok Ho

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime University



Abstract

Recently, many research works on the icebreaking vessels have been published as the possibility of passing Arctic routes has been increasing. The model ship test on the pack ice model in the ice basin is actively carried out as a way to investigate the performance of icebreaking vessels. In this test, The concentration as well as the individual area of pack ice are important since they directly affect the performance. However, it is difficult to measure the concentration because not only the pack ice has uneven shape but also it keeps floating around in the basin. In this paper, an algorithm to identify the concentration of pack ice is introduced. From a digital image of pack ice obtained in the ice basin, the goal is to measure the area of pack ice using an image processing technique. Instead of the general global binarization that yields numerical errors in this problem, a local binarization technique, coupled with image subdivision based on the quadtree structure, is developed.

Also the individual area and size distribution of each pack ice patch is calculated using the edge detection and the watershed technique. The obtained results are compared with the manually measured data to prove its accuracy.

KEY WORDS: Pack ice 팩아이스; Concentration 집적도; Local binarization 국부 이진화; individual size distribution 개별 면적 분포도; Segmentation 객체 분리;



제 1 장 서 론

1.1 북극항로

북극항로(north pole route)란 북극해를 통해서 극동과 유럽을 연결하는 항로를 말한다. 북극항로를 이용하게 되면 경제적 이점이 매우 많다. Fig. 1은 기존 항로와 북극항로의 거리를 나타낸다. 북극항로를 이용하게 되면 부산에서 로테르담 간 운항 거리는 수에즈항로 대비 32% 단축되며, 운항 일수는 기존 40일에서 북극항로 이용 시 30일로 10일이 단축 된다. 이는 선박 유지보수 및 운영비용, 운하 통행료, 해적 대비 비용을 절감할 수 있으므로 결과적으로 물류비를 절감할 수 있다. 또한, 수에즈 항로에 있는 남중국해 분쟁에 의한 안보 차원 불안감도 해소될 수 있다.



Fig. 1 Comparison of existing route and Arctic route distance (Source: Korea JongAng Daily)

북극항로에는 결빙기와 해빙기가 존재한다. 결빙기에는 크고 두꺼운 해빙들이 존재하기 때문에 선박이 통과할 수 없지만 해빙기에는 비교적 작고 얇은 해빙들이 존재기 때문에 가능하다. 과거에는 결빙기간이 길고 북극항로에 분포되어 있는 해빙들이 크고 두꺼우며, 선박들의 내빙 및 쇄빙 성능이 우수하지 않아 북극항로 이용이 어려웠다. 하지만 최근 우수한 성능의 내빙선 또는 쇄빙선 제작이 가능하며, 지구온난화로 인해 해빙

기간이 길어지고 얼음의 크기는 작아지고 양은 줄어들고 있으므로, 북극항로 이용가능성이 증가하고 있다. Fig. 2에서 북극의 해빙 모습과 1979년에 비해 2012년에 약 30%의 해빙이 없어진 것을 나타내며, Fig. 3은 2000년 북극해를 가득 채우고 있던 해빙 면적이 2100년에는 북극해 중앙부만 분포할 것이라는 예측을 나타낸다.

경제적 이점, 선박의 성능 향상, 운항을 위한 바다 환경 개선 등의 이유로 북극항로 이용에 대한 관심은 계속적으로 증가하는 추세이다.



Fig. 2 Variation of polar ice cap between 1979 and 2012 (Source: NASA)



Fig. 3 Prediction of sea ice in the Arctic Ocean (Source: National Geographic)

1.2 쇠빙선 및 내빙선 기초연구

북극항로를 이용하기 위해서는 쇠빙선이나 내빙선을 이용하여야 한다. 북극항로의 이용가능성이 증가함에 따라 이러한 선박에 대한 관심이 높아지고 기본 연구의 필요성도 함께 높아지고 있다.

쇠빙선이나 내빙선 성능향상을 위한 빙해수조 활용 모형선 실험이 활발히 이루어지고 있으며(Jeong, et. al., 2015), 수조에서 수행되는 주요 실험 중 하나가 팩아이스(pack ice, 유빙) 집적상태에서 저항이나 운항성능을 측정하는 것이다. 팩아이스란 부유빙 중 하나로, 정착빙 이외의 모든 해빙을 포함하는 넓은 의미의 용어이다. Fig. 4에서 한국해양플랜트선연구소(KRISO) 빙해수조를, Fig. 5에서 비 균일한 실제 환경의 팩아이스를 나타낸다.

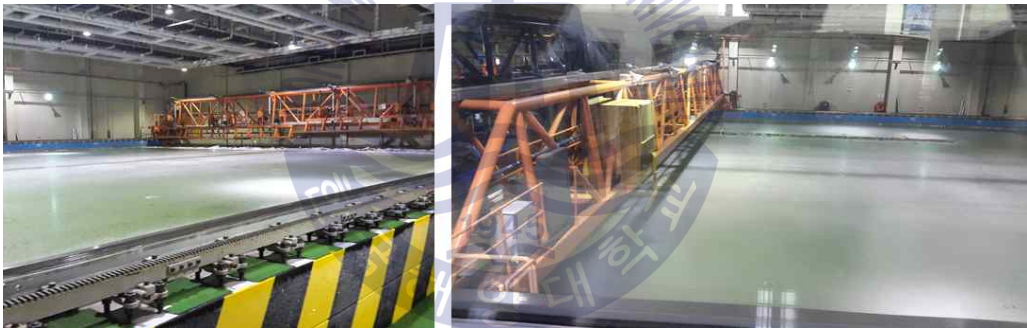


Fig. 4 Ice model basin of KRISO



Fig. 5 Non-uniform pack ice digital image (Source: AllPosters, doopedia)

팩아이스 상태에서 항해선박의 안정성을 평가하기 위하여 팩아이스 분포가 중요하므로 빙해수조에서는 다양한 형상과 분포를 가진 팩아이스에 대한 정보를 사전에 측정할 필요가 있고 이를 위하여 팩아이스에 대한 기본적인 연구가 요구되어 왔다. 이 때 팩아이스의 집적도(concentration) 측정이 우선되어야한다. 하지만 팩아이스는 빙해수조에서 임의적으로 떠다니므로 개별적으로 접근에 한계가 있고, 그 형상도 비균일하므로 집적도 측정에 어려움이 많다. 또한 개별 팩아이스를 추출하여 면적별 분포도를 측정하는 것은 더욱 어렵다. 본 연구 역시 팩아이스 집적도 측정에 대한 기본적인 연구를 목표로 삼는다. Fig. 6은 모형 실험을 위한 팩아이스 집적상태의 빙해수조를 나타내며, 팩아이스의 크기는 매우 다양하며, 형상은 비균일하다.



Fig. 6 Ice model basin with pack ice

1.3 선행연구

팩아이스 집적도를 측정하기 위해 일반적으로 직접 접근하지 않고 먼 거리에서 센서를 이용하여 대상물의 정보를 추출하는 리모트센싱(remote sensing)을 활용한다(Rees, 2005). 인공위성의 레이더를 이용하여 광범위한 영역의 팩아이스 정보 측정도 시도되었다(Johannessen, et al., 2000). 이 방법은 매우 광범위한 영역을 분석할 수 있다는 장점이 있지만 구름 및 안개의 영향을 많이 받고, 세밀한 측정이 어려운 것으로 알려져 있다.

국내에서 모델들의 면적을 사전 설정하고, 그에 맞는 사각형 형상의 전체 면적 및 팩아이스 모형을 제작하여 측정을 시도하였다(Cho, et al., 2013). 임의로 설정되어 있는 균일 사각형상의 객체들이므로 수학적 계산을 통해서 쉽게 계산가능하다.

Fig. 7은 균일 사각형상을 염두한 전체 면적 및 개별 팩아이스 제작 방법을 나타낸다. 전체 크기는 가로 2m, 세로 2m이며 개별 팩아이스는 가로 0.2m, 세로 0.2m로 가로 10개, 세로 10개, 총 100개로 제작되었다. Fig. 8에서 개별 팩아이스 60개를 전체 면적에 분포시켜 집적도 60%를 만들었으며, Fig. 9에서 80개를 분포시켜 집적도 80%를 만들었다.



Fig. 7 Uniform square pack ice (Cho, et al., 2013)



Fig. 8 Pack ice image planned with 60% concentration (Cho, et al., 2013)



Fig. 9 Pack ice image planned with 80% concentration (Cho, et al., 2013)

이 방법은 간단한 원리를 쉽게 집적도를 측정하지만 사람이 인공적으로 제작하므로 휴먼에러(human error)가 상당히 수반하며, 실제 팩아이스는 비균일한 형상이지만 이 방법의 팩아이스는 비현실적인 정사각 형상이므로 유사성이 떨어진다.

또 다른 방법으로는 촬영된 영상을 상용 소프트웨어를 통해 분석하여 보다 간편하고 빠른 측정을 시도하기도 했다(Cho, et al., 2013). 이 방법은 팩아이스가 분포되어 있는 곳을 촬영한 사진을 디지털 영상처리를 이용하는 방법이므로 다른 방법들에 비해서 초기 투자 및 운영비용이 낮고, 모든 형상에 대한 집적도를 측정할 수 있다는 장점이 있지만 사용자의 지속적인 관여가 필요하다는 제약성이 존재할 뿐만 아니라, 일반적인 대상에는 적합하지만 팩아이스 집적도 측정과 같이 특수한 환경에서의 분석이 요구되는 경우는 올바른 결과를 도출하지 못하는 약점을 보인다. 또한 부적절한 계산 결과를 도출하는 프로세스를 사용자가 커스터마이징(customize)하기 어렵다. Fig. 10은 상용 영상

처리 소프트웨어를 이용하여 팩아이스 집적도를 측정하기 위해 영상 이진화한 결과이다. 아래쪽의 동그라미 안에서 매우 부적절한 이진화 결과를 나타내고 있으며, 전체적으로도 오류 픽셀들이 분포되어 있다.

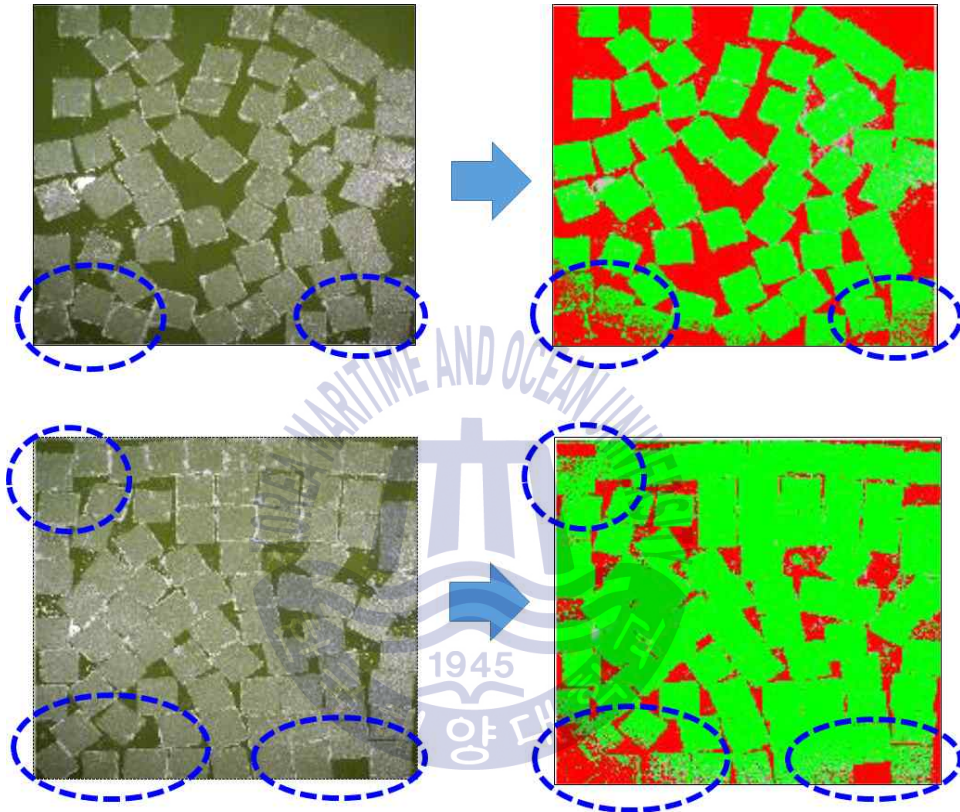


Fig. 10 Measurements of pack ice concentration using a commercial image processing software (Cho, et al., 2013)

팩아이스 집적도 측정에 최적화된 알고리즘은 국외에서도 연구되고 있고, 팩아이스 영상을 영상처리를 통해서 면적별 분포도를 측정한 사례가 발표된 바 있다(Zhang, et al., 2015). 이 연구에서는 넓은 영상을 분석하기 위하여 전처리로 영상을 수동 분할하여 분석을 수행하고, GVF Snake 알고리즘을 통해서 개별 팩아이스를 추출하는데, 이는 초기 입력 커브, 신축, 강성, 점도, 영상 가중치 조절 변수에 의하여 민감하므로 사용자가 활용하는데 있어 어려울 수 있다.

Fig. 11은 원본영상(좌)에서 도출한 면적별 분포도(우)를 나타내고, Fig. 12는 GVF snake 알고리즘의 입력 값에 따른 민감한 결과 변화를 나타낸다.

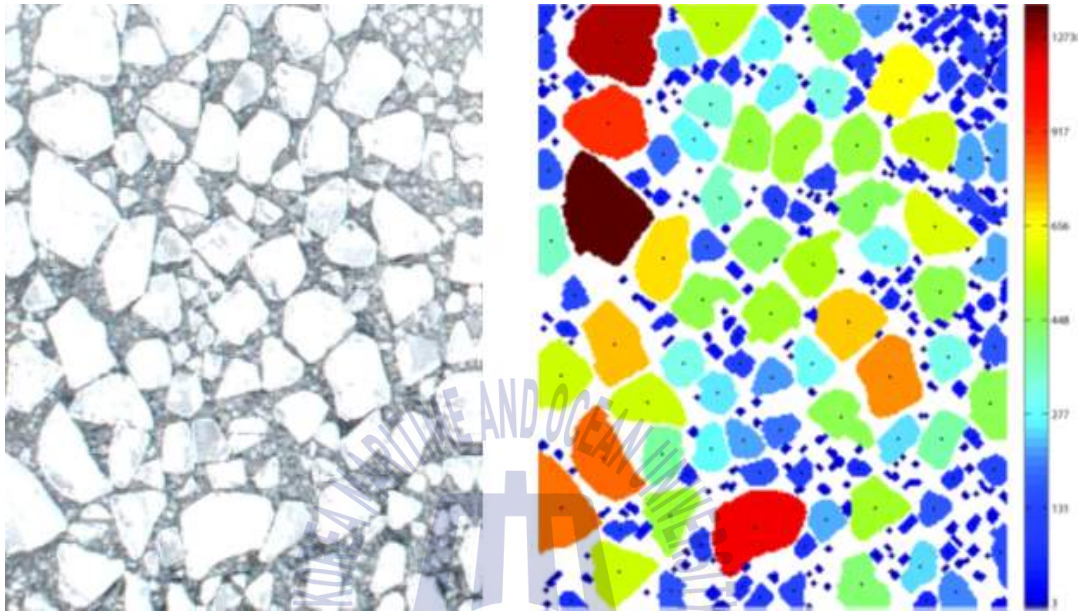


Fig. 11 Area distribution(right) derived from original image(left) (Zhang, et al., 2015)

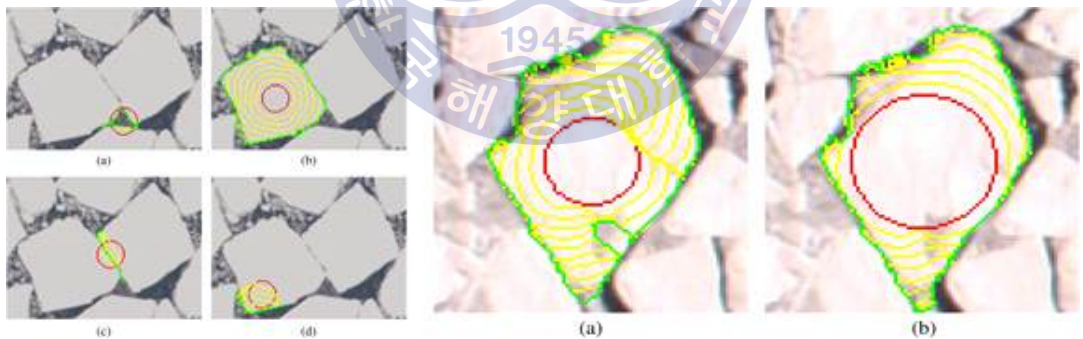


Fig. 12 Sensitive result change according to input value (Zhang, et al., 2015)

같은 시기에 수동영상분할 개념을 포함하고 빛이나 색상 불균일 영역에 대한 이진화를 수행한 알고리즘도 소개되었다(Byun, et al., 2016). Fig. 13은 전역 및 국부 이진화 결과를 비교하며, 원본 영상(좌)을 전역 이진화한 전역 이진 영상(중간), 국부 이진화한

국부 이진 영상(우)이다. 점선 원 영역을 보면 전역 이진화에서 찾아내지 못하는 얼음을 로컬 이진화에서는 정확히 인식한다.

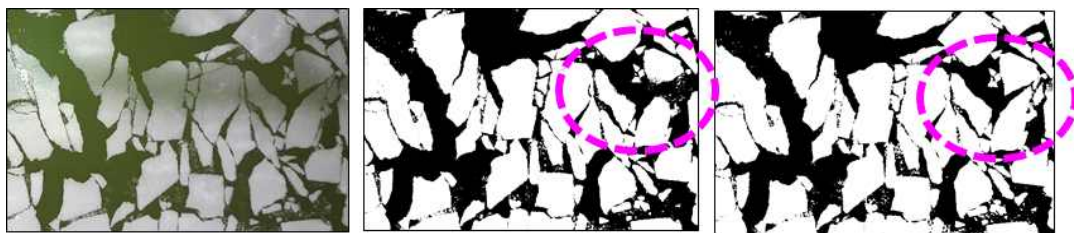


Fig. 13 Comparison of results from global(mid) and local(right) binarization of original image(left)

수동 분할의 방법 및 횟수를 결정하기 위해서는 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 결정된 방법 및 횟수가 부적절한 경우 정확하지 않은 영상분석결과가 도출되므로 각별한 주의를 기울여야 한다.

1.4 개요

수동 영상 분할의 한계를 극복하고자 본 연구에서는 자동화된 영상 구획화 알고리즘을 개발하고, 이로 구획화된 각 영상들에 독립적으로 계산된 다른 임계값들을 적용하여 이진화한다. 팩아이스 정지 영상의 특성을 분석하여 이진화를 위한 최적 임계값을 계산하고 임계값을 계산할 수 없는 영상은 주변 영역을 비교분석하는 기법을 개발하여 적용한다. 이로부터 전체적으로 국부 이진화 효과를 유발시켜, 팩아이스와 물을 정확히 분리한다. 개발 알고리즘을 통해서 팩아이스 집적도가 정확히 산출됨을 수치적으로 검증한다.

GVF snake를 통한 개별 객체 추출 알고리즘의 초기 값에 민감하다는 점을 보완하기 위해, watershed 알고리즘을 팩아이스 개별 객체 추출에 적합하도록 개선한다.

디지털 영상처리를 위하여 OpenCV 오픈소스 기반의 디지털 이미지 프로세싱 기술 (Itseez, 2014)을 사용하였다.

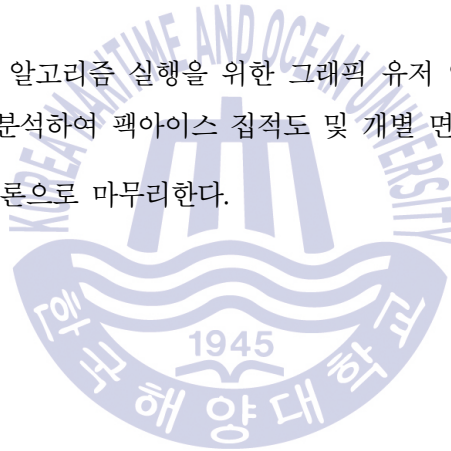
1장 서론에서 연구의 필요성과 선행연구, 본 논문의 개요에 대해서 말하고, 2장에서 본 연구에서 활용한 오픈 컴퓨터 비전 라이브러리 OpenCV와 디지털 영상 처리의 기본 개념에 대하여 설명한다.

3장에서 팩아이스와 물을 분리시키기 위해 팩아이스 영상의 특성을 분석하고, 팩아이스 영상 이진화에 적합한 최적 임계값을 찾고, 빛 불균일, 색상 차로부터 발생할 수 있는 전역 이진화 문제 해결을 위한 구획화 국부 이진화의 효과를 확인한다.

4장에서는 3장에서 분석한 팩아이스 영상 특징과 국부 이진화 기법 이론을 통하여, 쿼드트리 활용 자동 구획화(분할) 알고리즘을 개발하고, 5장에서는 4장 개발 알고리즘 결과 영상으로부터 개별 팩아이스 추출 알고리즘을 개발하고, 면적 분포도 도출에 대하여 설명한다.

6장에서 4, 5장의 개발 알고리즘 실행을 위한 그래픽 유저 인터페이스 모듈을 소개하고, 그것을 통해 예제를 분석하여 팩아이스 집적도 및 개별 면적 분포도를 확인한다.

마지막으로 7장에서 결론으로 마무리한다.



제 2 장 OpenCV 및 디지털 영상 처리

2.1 OpenCV

OpenCV는 실시간 컴퓨터 비전(computer vision) 또는 디지털 영상 처리를 수행하기 위한 프로그래밍 함수 라이브러리로 여러 플랫폼 활용가능하며, 공개 소스로 무료 활용 가능하다. 원래 인텔 연구소에서 개발되었으며, 후에 Willow Garage의 지원을 받았고, 지금은 Itseez로부터 유지되고 있다.

1999년 공식 착수한 OpenCV 프로젝트는 초기에 CPU-집중 애플리케이션 발전을 위한 인텔 연구소의 계획이었다. 러시아 인텔의 최적화 전문과와 인텔의 성능 라이브러리 팀이 주요 공헌했다.

OpenCV 알파 버전은 2000년 컴퓨터 비전 및 패턴인식 IEEE 컨퍼런스에서 출시되었고, 그 후 5개의 베타들이 2001년부터 2005년까지 배포되었고, 1.0버전은 2006년에 출시되었다. 2008년 중반 Willow Garage에서 지원을 시작하였고, 2008년 10월에 1.1버전을 출시한다. 이후 지속적인 업데이트를 통해서 현재 Itseez로부터 지원되는 최신 3.1버전이 배포되고 있다.

핵심 기능으로 모션·얼굴·행동 인식, 휴먼-컴퓨터 인터랙션(HCI; human-computer interaction), 모바일 로보틱스(mobile robotics), 모션 이해(motion understanding), 객체 인식(object identification), 분리 및 인식(segmentation and recognition), 스테레오스코픽 스테레오 비전(stereoscopic stereo vision), 모션 트래킹(motion tracking), AR(augment reality) 등이 있으며, 통계적 머신 러닝 라이브러리도 포함하고 있다.

본 연구에서는 OpenCV를 활용하여 팩아이스 정보 추출 디지털 영상처리 기술을 개발한다.



Fig. 14 OpenCV logo

2.3 디지털 영상처리 및 활용 분야

디지털 영상의 수치를 컴퓨터 알고리즘을 통해서 처리하여 영상을 개선하거나 영상 외의 추가 정보를 추출하는 등을 디지털 영상처리라고 한다. 대표적 처리 기법으로는 기하학적 변환, 색 보정, 화질 개선, 등이 있으며, 정보 추출 기법은 글자인식, 얼굴인식, 차선인식, 부품 결함 판독 등이 있다.

디지털 영상처리는 문서처리, 국방, 의료, 산업, 방송, 영화, 증강현실, 보안 등의 분야에서 사용된다. 문서처리란 촬영 또는 스캔 된 문서 영상을 디지털 문서 파일로 자동 변환해주는 것으로 확장해서 문서를 분류하는 등으로 활용될 수 있다. 국방 분야에서는 유도 미사일의 물체 추적기술과 CCTV를 통한 경계근무 자동화 등을 위해 영상처리를 활용한다. 자동차 산업에서 자율주행 기술, 증강현실에서는 마커인식, 공장 자동화를 위한 부품 결함 판독 등 매우 여러 분야에서 활용되고 있다. Fig. 15에서 영상처리를 이용한 자율주행 시스템과 Fig. 16에서 의류매장에서 증강현실 사례를 나타낸다.



Fig. 15 Auto-driving system (Source: SK energy)



Fig. 16 Augmented reality (Source: FX gear)

2.4 디지털 영상 및 종류

아날로그 영상은 아날로그 정보를 갖고 있는 영상으로 있는 대상을 그대로 모방하여

그 자체가 영상을 나타기내지만, 디지털 영상은 수치적 정보를 갖고 있는 각 화소(pixel)들이 행렬형태로 배열되어 있고, 이를 표현하여 영상을 나타낸다. 행렬의 위치는 영상에서의 위치 정보를 의미하며, 각 화소의 수치는 그 위치에서 색조 값(tonal value)을 나타낸다. 이러한 수치들은 제어 및 분석, 변형하여 여러 가지 유용한 정보들을 추출할 수 있다.

Fig. 17에서 아날로그 영상(좌)과 디지털 영상(우)의 차이를 말하며, 아날로그 영상은 자체가 대상을 나타내고, 디지털 영상은 각 화소의 수치들이 대상을 표현하고 있다.



Fig. 17 Analogue(left) versus digital(right) image

디지털 영상은 이진(binary), 회색도(gray level), 컬러(color) 영상으로 분류할 수 있다.

이진 디지털 영상의 각 화소들은 단 두 개의 수치만 표현할 수 있으며, 일반적으로 0 또는 1(또는 255로 표현)의 값을 사용하는데, 다른 수치도 사용될 수 있다. 보통 0은 검은색 1은 흰색을 표현하지만, 다른 색상으로도 표현할 수 있다. 각 화소들은 이진 데이터만을 갖고 있으므로 적은 용량이며 현실을 명확하게 표현할 수 없다. 단순한 형태로 분석이 쉬워서 영상처리를 위해서 많이 활용된다.

회색도 디지털 영상은 256개 중 하나의 값으로 표현되며, 보통 0-255 범위의 값들이

사용되며 이 값들은 검은색에서 흰 색까지 변하는 밝기를 의미하며, 수치가 0 근처 일수록 검은색에 가까운 어두움, 255 근처 일수록 흰색에 가까운 밝음을 표현한다. 이러한 형태의 데이터를 1채널이라고 말한다. 완벽 색체를 표현하지 못하지만, 이진 영상에 비해서는 현실 표현이 우수하다. 보통 흑백영상(black and white image)이라하면 회색도나 이진 영상을 말한다.

컬러 디지털 영상에서 각 화소는 삼원색인 빨간, 초록, 파란 각각에 밝기 분포에 대한 정보가 포함되어 있으며, 각각은 256개의 값들 중 하나씩으로 표현되며, 회색도와 마찬가지로 보통 각각 0-255 범위의 값을 사용한다. 즉 회색도와 같은 형태의 데이터가 3중으로 겹쳐져있는 형태이며, 이는 3채널을 말한다. 각 채널들은 종합하여 컬러를 표현한다. 회색도에 비해 3배 데이터를 사용하며, 완전히 색체를 표현하기 때문에 완벽한 현실 표현이 가능하다. 일반적으로 사진은 컬러영상을 말한다.

Fig. 18에서는 이진(좌), 회색도(중간), 컬러(우) 디지털 영상과 각 영상의 수치 형태 차이를 나타낸다. 이진영상은 검정색과 흰색으로 표현되어있으며, 0과 255 두 개 중 하나의 수치를 갖는다. 회색도 영상은 검은색부터 흰색까지의 밝기로 표현되며, 0에서 255까지 중 하나의 수치를 갖는다. 컬러영상은 완전한 색체를 표현하며, 빨간, 초록, 파란 채널들은 0에서 255까지 중 각각 하나의 수치들을 갖는다.



Fig. 18 Binary(left), gray level(mid), color(right) digital image

2.5 컬러영상의 색 공간

평면이나 공간에서 점의 위치를 표현하기 위해 직교좌표계, 빗좌표계, 원기둥좌표계 등을 사용할 수 있다. 마찬가지로 디지털 영상에서 색을 표현하기 위해 여러 가지 방식을 사용할 수 있는데, 이 방법을 색 공간(color space)이라고 한다. 대표적으로 RGB(red green blue), HSV(hue saturation value, 색상 채도 밝기), YCbCr(luminance color differences, 휘도 색차들)로 나타내질 수 있으며, 이밖에 여러 종류의 색 공간들이 있다.

RGB는 빛의 삼원색을 이용하여 색을 표현하는 방법으로, 색을 혼합할수록 색이 밝아지는 가산체계(additive system)를 사용한다. 사람이 쉽게 인식하는 삼원색을 활용하므로 매우 친숙하게 느껴지나, 조합 결과를 예상하기 어렵다는 단점이 있으므로, 활용도는 떨어진다. Fig. 19는 가산혼합의 원리를 나타내고 있다. 빨간색과 초록색이 합하여 노란색을 나타내며, 빨간색과 파란색이 합하여 자홍색(magenta)을 나타내고, 파란색과 초록색이 합하여 청록색(cyan)을 나타낸다. 빨간, 초록, 파란 삼원색이 모두 합하여 흰색을 나타낸다. Fig. 20은 RGB 상자 모델을 나타내며, 이는 빨간, 파란, 초록색들의 조합이 어떤 색상을 표현하는가를 시각적으로 판별하기 위해서 사용한다. 원점에서 R 방향으로 갈수록 빨간색이 진해지며, B 방향이나 G 방향으로 갈수록 파란색이나 초록색이 진해지는 원리이다. 각 색들은 혼합되어 많은 색상을 표현할 수 있다.

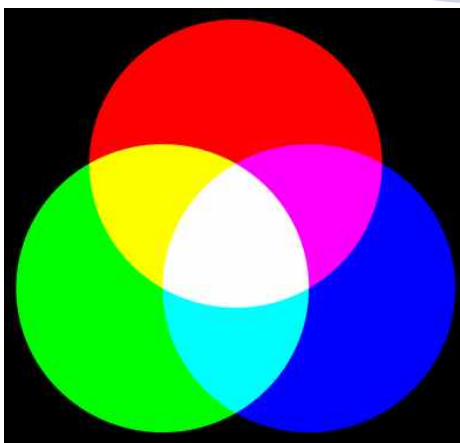


Fig. 19 Principle of additive mixing
(Source: wikipedia)

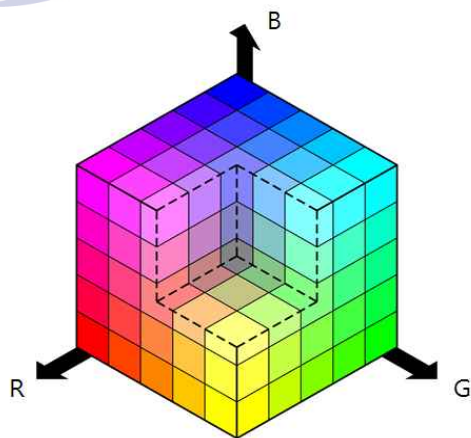


Fig. 20 RGB cube model
(Source: wikipedia)

HSV는 색상(hue), 채도(saturation), 명도(value)를 통해서 색을 표현하는 방법이다. 색상 값은 0에서 360도의 범위를 갖고, 0도 빨강에서 시작하여 노랑, 초록, 파랑, 자홍을 거쳐서 360도 빨강으로 변한다. 채도는 0에서 100%의 범위로 0% 무채색에서 가장 진한 100%로 변한다. 명도도 0에서 100%의 범위이며, 빨강, 초록, 파랑, 흰 등 100%에서 검은 색 0%까지 변하는 형태이다. RGB의 상자모델과 같이 HSV는 원뿔 또는 원기둥 모델로 나타낼 수 있으며, 이를 Fig. 21에서 나타낸다. 회전 화살표 시작점이 0도이며, 회전하면서 빨강, 초록, 파랑, 자홍을 거쳐 360도에서 다시 빨강이 된다. 원뿔, 원기둥 회전축이 채도 0%이며 무채색을 나타낸다. 바깥쪽으로 갈수록 100%로 진한 채도를 갖는다. 제일 아래의 밝기 0% 검은색에서 시작하여 제일 위의 밝기 100% 흰색까지 변한다.

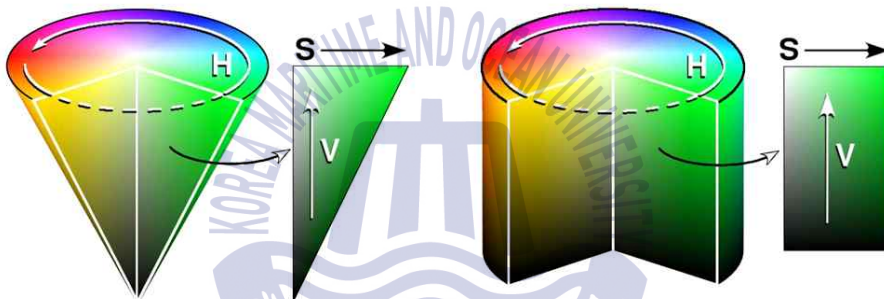


Fig. 21 Conical(left) and cylindrical(right) models of HSV (Source: wikipedia)

YCbCr은 휘도와 색차 성분들을 이용해서 색을 표현하며, 주로 디지털 이미지 압축 형식으로 활용하여 디스플레이하기 위해서 사용된다. 이밖에 컴퓨터 그래픽스 및 프린터 잉크 등을 위한 CMYK(cyan magenta yellow black), 조명을 위한 CIE(commission internationale de l'éclairage), 컬러TV를 위한 YIQ 등의 색 공간 등이 있다.

하나의 컬러영상은 여러 방식의 색 공간으로 표현될 수 있으며, 각 색 공간은 여러 개의 색 속성(color attribution)들로 구성되어 있다. 각각의 색 속성에 있는 값들은 그 디지털 영상에서 그 속성에 대한 특성을 나타낸다. 예를 들어 HSV로 표현 된 컬러 디지털 영상은 색상, 채도, 밝기의 색 속성들로 분리시킬 수 있으며, 이는 색상, 채도, 밝기 특성을 나타낸다. 각 특성별로 분리된 색 속성들은 특정 영상처리를 위해 적합하게 활용될 수 있다. Fig. 22는 여러 색공간의 색 속성들을 나타낸다.

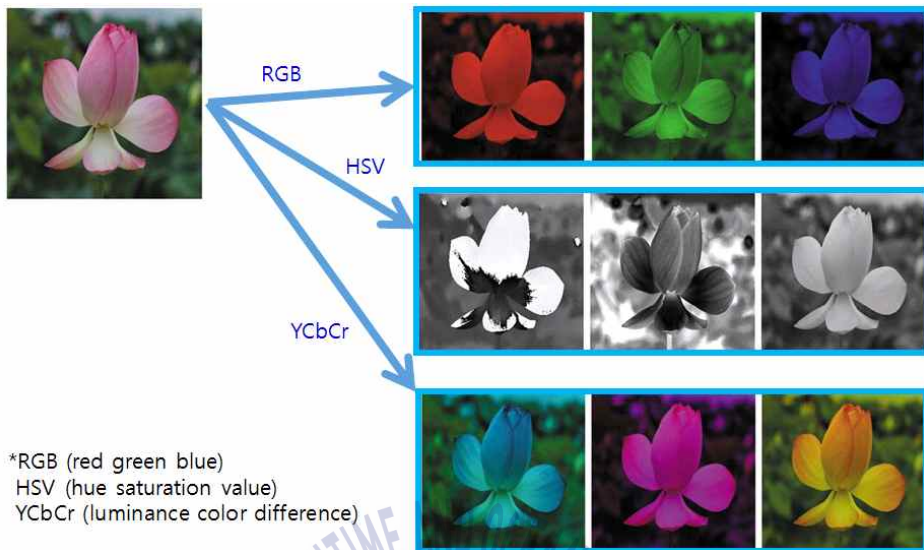


Fig. 22 Color attributes of multiple color space

(Source: Introduction to Digital Image Processing, hanbit media)

2.6 영상 히스토그램

특정 디지털 영상을 분석하기 위해서는 가로축은 색조값, 세로축은 픽셀 수로 구성된 막대그래프인 영상 히스토그램(image histogram)을 활용할 수 있으며, 이는 데이터의 특징을 한 눈에 알아볼 수 있도록 돕는다.

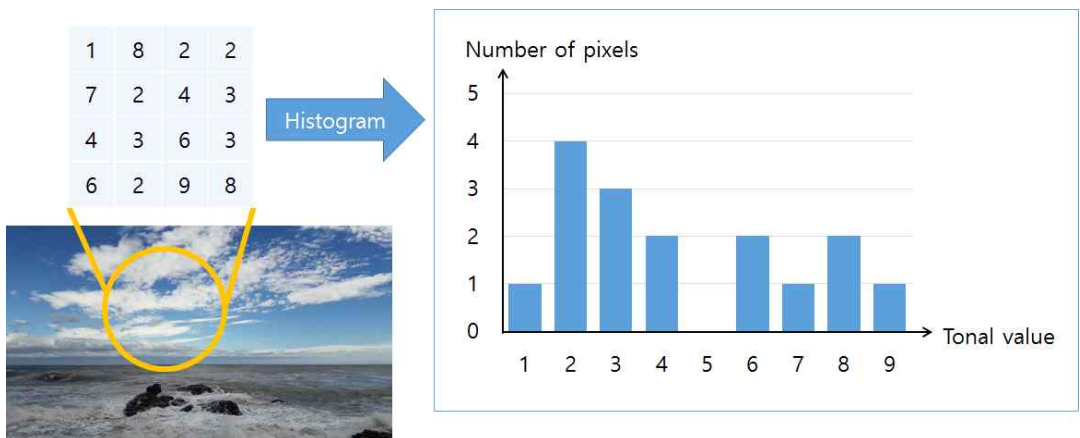


Fig. 23 Concept of image histogram

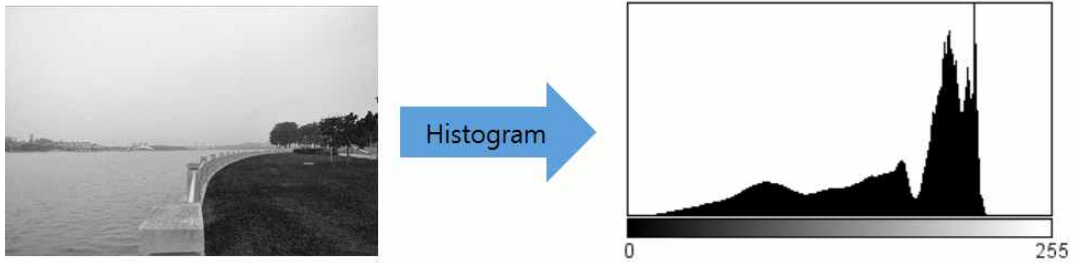


Fig. 24 Example of image histogram

2.7 이진화와 임계값

이진화(binanzation, thrsholding)는 컬러영상을 이진영상으로 변환하는 영상처리 기술이다. 영상처리 분야에서 이 기술은 복잡한 데이터를 단순화시키거나 영상 내의 배경과 전경을 분리 또는 2개의 객체 분리시키기 위해서 널리 활용된다.

이진화의 원리 설명을 위해 Fig. 25(좌)를 보면, 왼쪽은 한 영상의 픽셀 맵을 나타내며, 0에서 9까지의 색조 값이 분포되어 있고, 0에 가까운 값은 어둡고, 9에 가까운 값은 밝다고 가정한다. 이때 색조 값 4를 기준으로 이하의 값을 갖는 화소는 검은색(0)으로, 초과하는 값을 갖는 화소는 흰색(1)으로 구성된 영상(Fig. 25 우)을 생성하면, 이것이 이진영상이다.

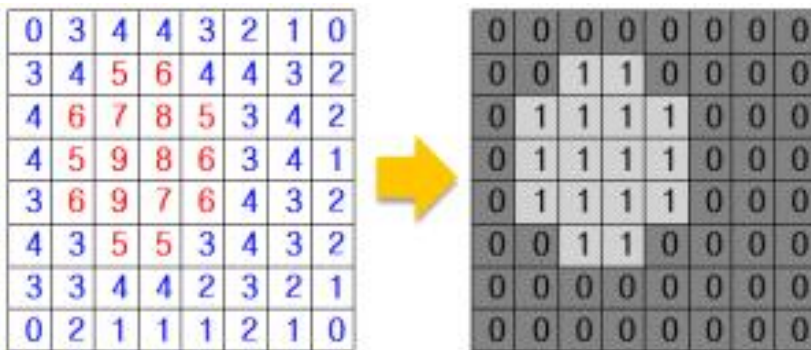


Fig. 25 Principle of binarization

위의 과정에서 색조 값 4를 기준으로 이진화 하였는데, 만약 다른 값을 기준으로 이

진화를 하면 다른 결과를 도출 할 것이다. 그러므로 이진화에서는 기준 값은 매우 중요한 요소로 작용한다는 것을 알 수 있다. 이 값을 임계값(threshold)이라고 한다. 임계값을 설정하는 여러 가지 방법이 있다.

대표적으로 평균 임계값, Otsu 임계값이 있다. 평균 임계값이란 모든 화소 색조 값들의 평균을 임계값으로 설정하는 방법으로 매우 단순하여, 이론 이해를 위해서 활용되며 실질적인 영상처리를 위해 활용되는 경우는 드물다. Otsu 임계값은 이진화를 위해서 매우 널리 사용된다. 이는 전체 화소 색조 값들의 분산 및 표준편차를 고려하여 이진화를 위한 적절한 임계값을 도출하는 방법이다.

다음 식은 이진화 방법을 수학적으로 표현하고 있다.

$$I(x,y) = \begin{cases} 0 & (\text{if } i(x,y) \leq T) \\ 255 & (\text{if } i(x,y) > T) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $i(x,y)$ 는 원본 영상의 x행, y열의 색조값, $I(x,y)$ 는 이진화된 영상의 x행, y열의 색조값, T는 임계값(threshold)을 의미한다. 만약 원본 영상의 한 픽셀의 색조값이 임계값 이하라면, 이진영상 그 위치의 색조값을 0(검정색)으로, 그렇지 않은 경우는 255(흰색)를 할당한다.

Fig. 26은 원본 영상(좌)으로부터 이진화하여 생성된 이진영상(우)을 나타낸다.

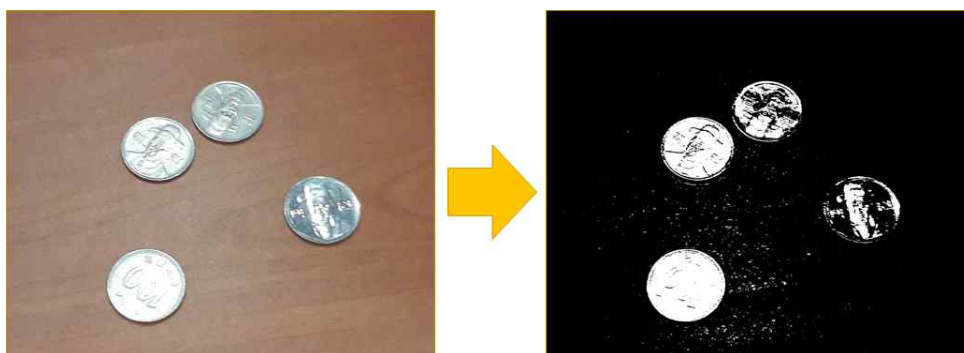


Fig. 26 Example of binarization

2.8 엣지 검출 및 윤곽 추출

엣지(edge) 검출을 위해서 보편 적으로 활용되고 있는 알고리즘으로는 Sobel, Prewitt, Robert, Laplacian, Canny, 등이 있다. 이중 대표로 아래에 라플라시안 필터를 수학적식을 나타낸다.

$$L(x,y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (4)$$

여기서 $L(x,y)$ 는 원본 영상의 x행, y열의 라플라시안 필터된 엣지를 나타내는 값, I 는 영상을 나타내며, 식은 영상을 x, y 양방향으로 편미분함을 의미한다.

식 (5)는 영상에서 미분하는 방법을 수학적으로 표현하고 있으며, 영상 전체 픽셀들 각각에 커널을 곱하는 것을 의미한다. 식 (6)은 커널을 나타낸다.

$$I'(x,y) = I(x-1,y-1) \times K1 + I(x-1,y) \times K2 + I(x-1,y+1) \times K3 \\ + I(x,y-1) \times K4 + I(x,y) \times K5 + I(x,y+1) \times K6 \\ + I(x+1,y-1) \times K7 + I(x+1,y) \times K8 + I(x+1,y+1) \times K9 \quad (5)$$

$$K = \begin{bmatrix} K1 & K2 & K3 \\ K4 & K5 & K6 \\ K7 & K8 & K9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $I(x,y)$ 는 원본 영상의 x행, y열의 색조값, $I'(x,y)$ 은 엣지 영상의 x행, y열의 값을 나타내며, K1-K9는 식 (6) 커널의 개별 요소를 나타낸다.

Fig. 27은 원본영상(좌)으로부터 추출된 엣지 영상(우)을 나타낸다.

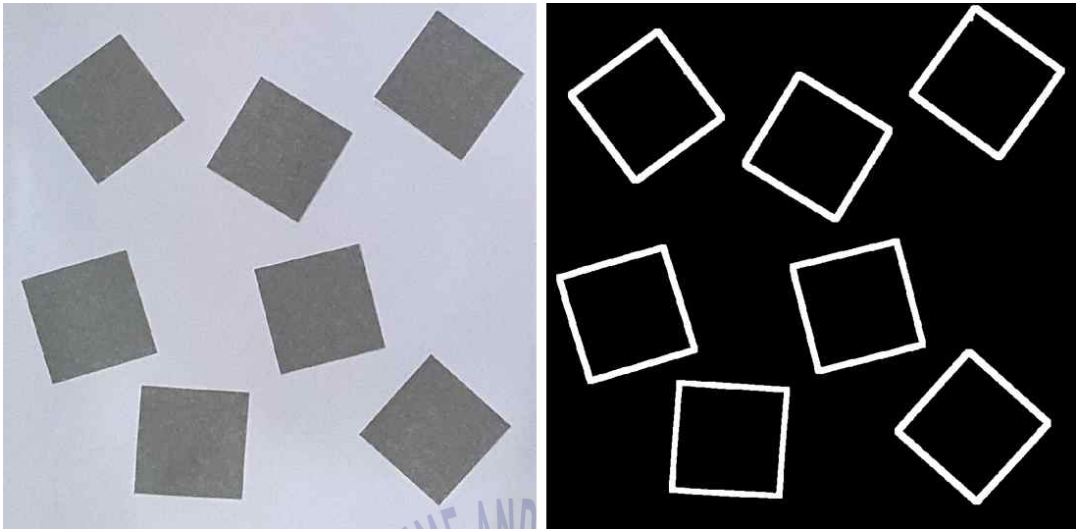


Fig. 27 Example of Rafflesian edge detection

영상에서 엣지란 색조 값의 변화가 큰 부분으로 배경과 전경이 분리되거나 서로 다른 객체가 만나는 것을 말한다. 반면, 윤곽(contour)이란 개별 객체의 완전한 둘레 정보를 나타낸다. 윤곽 추출을 위해서는 먼저 객체 라벨링이 수행되어야하고, 라벨링 객체에서 엣지를 추출한 뒤 연결되어 있는 엣지를 한 객체의 윤곽으로 판단하여 모든 객체의 윤곽 정보를 추출한다.

Fig. 28은 엣지와 윤곽의 개념을 비교하며, 원본(좌) 영상, 엣지(중간), 윤곽(우)을 나타낸다. 엣지는 개별 객체 외곽 정보가 아닌 단순히 색상차가 발생하는 선을 추출하므로 검은색 선으로만 표현, 윤곽은 개별 객체의 외곽을 분리시켜 정보를 추출하므로 서로 다른 색상으로 표현하고 라벨링된다.

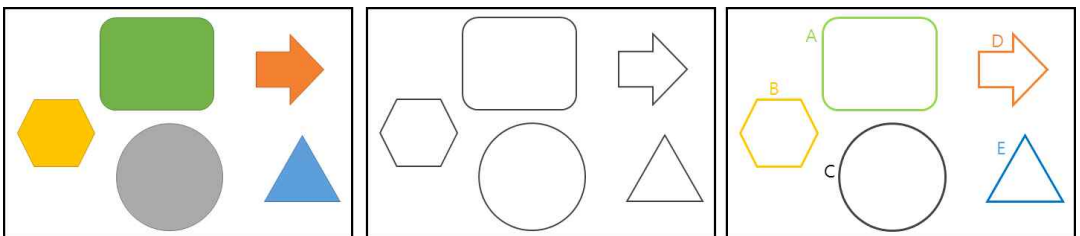


Fig. 28 Original image(left), edge(mid), contour(right)

2.9 형태학 처리

형태학 처리(morphology)란 구조요소를 이용해서 이진영상의 흰 영역을 확장시키거나 축소시키는 것을 말하며, 확장을 통해서 객체 연결, 구멍 채움, 잡음 제거 등의 효과를 낼 수 있고, 축소를 통해서 객체 분리, 구멍 확장, 골격 추출 등으로 활용 가능하다. 형태학적 처리는 침식(erosion), 팽창(dilation), 열기(opening), 닫기(closing) 4종류가 있으며, 흰 영역을 대상으로 하며 침식은 영역 축소, 팽창은 확장, 열기는 침식 후 팽창, 닫기는 팽창 후 침식을 수행한다.

Fig. 29는 형태학 처리를 단순화한 원리를 나타낸다. 원본 영상을 구조요소(element)로 침식, 팽창, 열기, 닫기를 수행한 결과이다. 침식은 원본 영상의 픽셀들 중 구조요소가 동일하게 포함 될 수 있는 픽셀들 중 중앙 픽셀만이 흰색으로 표현되며, 팽창은 원본 영상의 흰색픽셀들 위치에서 구조요소만큼 확장하여 흰색을 표현하는 것이다. 열림에서 재팽창된 영역은 연한 흰색으로 표현하였으며, 닫힘에서 재침식된 부분은 진한 검은색으로 표현한다.

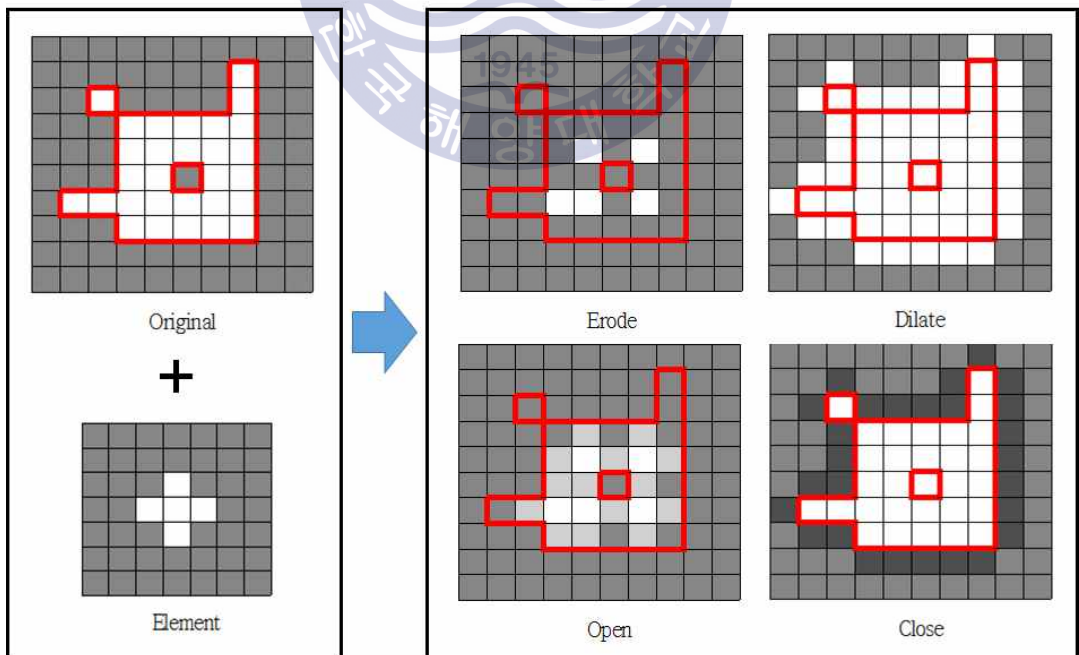


Fig. 29 Principle of morphology

2.10 Distance transform

Distance transform은 객체의 외곽에서부터 중심으로 갈수록 높은 값이 할당되는 맵을 만드는 알고리즘으로, 객체의 중심 지점을 추출하기 위해 주로 활용한다.

Fig. 30은 distance transform의 원리를 설명하며, 원본영상(좌)과 distance transform 맵(우)을 나타낸다. 원본 영상은 0(검은색)과 1(흰색)으로 이루어진 영상이고, distance transform 맵은 외곽(0)에서부터 내부로 들어갈수록 숫자가 1씩 증가된다. Fig. 31은 원본영상(좌)으로부터 distance transform 적용 결과를 정규화해 시각적으로 나타낸 것(우)으로, 내부로 들어갈수록 점점 밝음으로 표현된다.

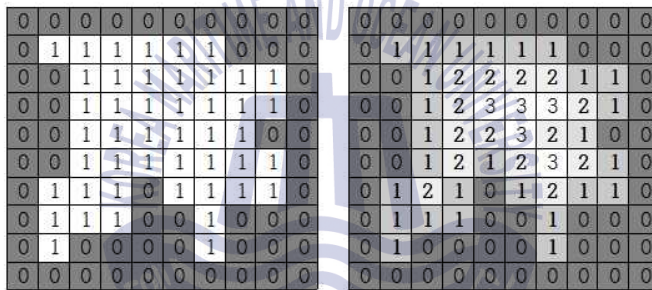


Fig. 30 Principle of distance transform

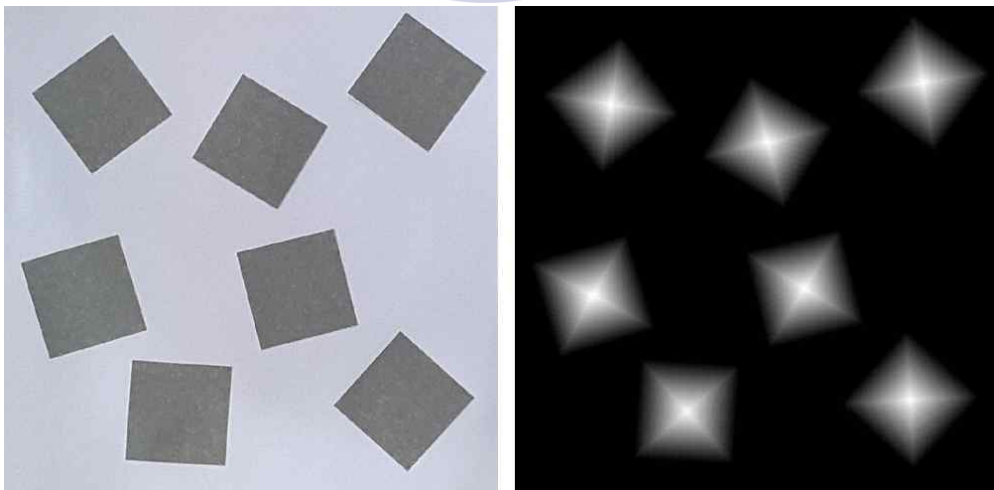


Fig. 31 Original image(left) and normalized distance transform result(right)

2.11 워터셰드

워터셰드(watershed)란 영상을 2차원 지형으로 간주하여 물을 채워나가며 물과 지형이 만나는 경계를 이용해 겹쳐져 있는 객체들을 분리하여 객체의 실제 윤곽(contour)을 찾아내는 알고리즘이다(Beucher, et. al. 1979).

영상 픽셀 값에 따라 높낮이를 표현하여 영상을 Fig. 32와 같이 지형학적 표면으로 간주할 수 있다. 여기서 일정 범위 주위 픽셀과 비교해서 가장 작은 값을 가진 픽셀을 최소 점(minima)으로 정하고, 물이 차오를 때 높이가 낮은 지역에서부터 범람하는 것과 같이 이 최소 점들로부터 범람을 시작하여 영역을 분할한다. 이때 다른 최소 점으로부터 흘러 들어오는 물의 침범(overflow)을 막아, 서로 다른 지역으로 영상을 분할하기 위해 분수령선(watershed line)을 이용한다. 이와 같이 구분된 영역을 집수분지(catchment basin)라고 한다. 최소 점들로부터 수위가 높아져 다른 최소 점의 영역을 침범하는 지점에 댐(dam)을 건설한다면 이 댐들이 분수령 선이 되고, 물이 끝까지 차서 모든 범람과정이 끝나면 분수령 선에 의해 둘러싸인 여러 영역들이 생성된다. 영상에서 이렇게 영역을 분할하는 방법을 워터셰드 알고리즘이라고 한다(Kim, et. al., 2009).

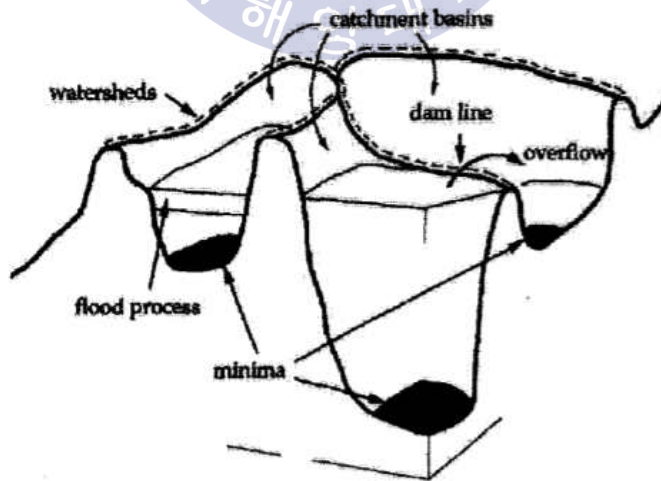


Fig. 32 Principle of watershed segmentation (Kim, et. al., 2009)

제 3 장 팩아이스 영상 특징 및 이진화

3.1 팩아이스 영상 특징

대부분의 팩아이스 영상은 상대적으로 밝은 팩아이스 부분과 반대로 어두운 물 부분으로 구성된다. 따라서 이상적인 팩아이스 영상의 히스토그램을 분석해 보면 밝은 부분의 값들이 분포되어있는 하나의 피크(peak)와 어두운 부분이 분포되어 있는 또 다른 피크, 그리고 두 피크 사이에 하나의 밸리(valley)로 구성됨을 알 수 있다. 실제 영상을 분석해보면 대부분의 팩아이스 영상은 피크나 밸리의 높이, 너비, 위치는 조금씩 다르지만 두 개의 피크와 밸리를 갖는 형태를 가진다. 이러한 형태를 쌍봉형(twin peaks, bimodal) 히스토그램이라고 하며, 그 대표적인 예가 Fig. 33에 보인다.

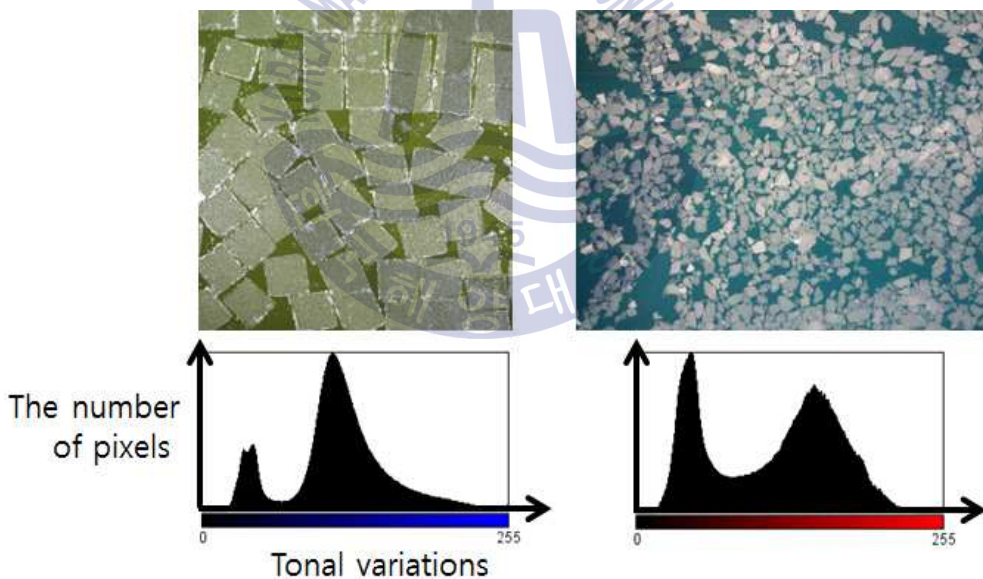


Fig. 33 Histogram of an ideal pack ice image

3.2 최적 임계값

쌍봉형 히스토그램을 갖는 팩아이스 영상들에서 두 개의 피크를 명확히 구분할 수 있

는 임계값을 설정하여 이진화한다면 이론적으로 물과 팩아이스를 완벽하게 분리할 수 있다.

Fig. 34는 팩아이스 원본 영상(위), 팩아이스 추출 영상(중간), 물 추출 영상(아래)에 대한 히스토그램을 나타내고 있다. 팩아이스 추출 영상의 히스토그램을 보면 원본 히스토그램의 오른쪽 피크는 팩아이스로부터, 물 추출 영상의 히스토그램을 보면 원본 히스토그램의 왼쪽 피크는 물로부터 추출되었다는 것을 알 수 있다. 이를 통해서 첫 번째 피크가 끝나는 지점 및 두 번째 피크가 시작되는 지점을 임계값으로 설정하여 이진화하면 팩아이스와 물이 완전하게 분리되는 결과를 도출할 수 있다.

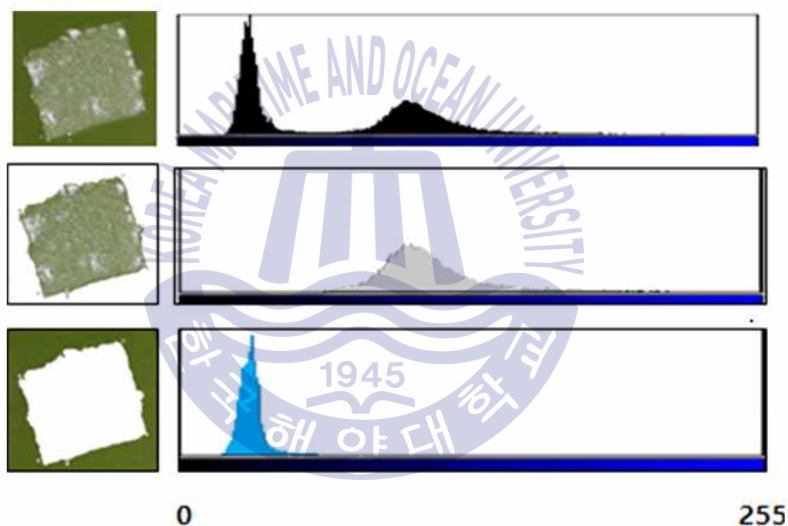


Fig. 34 Histograms of original image (top), ice image (mid), and water image (bottom)

대부분의 팩아이스 영상의 히스토그램 피크는 두 개이므로 위의 임계값을 통해서 이진화한다. 하지만 특정 경우에서 한 개의 피크가 두 개로 분리되는 경우가 있는데 이런 경우에는 피크가 3개 이상 존재하는 비정상상태가 된다.

Fig. 35는 피크가 세 개 존재하는 히스토그램들이다. 왼쪽 히스토그램에서 첫 번째 피크는 물에 의해서 나타나고, 두 번째, 세 번째는 팩아이스에 의해서 나타난다. 팩아이스에 의하여 두 개의 피크가 발생한 이유는 이 영상이 밝은 팩아이스와 어두운 팩아이스를 같이 가지고 있기 때문이다. 반면 오른쪽 히스토그램에서는 첫 번째와 두 번째 피크

는 물에 의해, 세 번째는 팩아이스에 의해 나타난 것으로 보인다. 물에 외부적인 환경이 작용하여 물의 색상이 두 가지로 나타나 있기 때문이다.

넓은 영역의 팩아이스 전체 영상 히스토그램은 보통 피크 두 개로 표현되지만 국부 영역의 영상에서는 주변 환경에 대해 예민해지기 때문에 세 개 이상의 피크가 빈번하게 발생하는데, 이를 처리하는 기술이 쉽지 않다.

본 연구에서는 이웃한 피크의 밝기 차가 가장 큰, 즉 피크 간 간격이 제일 긴 구간이 팩아이스와 물이 분리되는 곳이라는 분석결과를 내리고, 이 구간에서 밸리 최저점을 임계값으로 사용할 것을 제안한다. Fig. 35에서 점선 화살표는 피크가 3개인 히스토그램에서의 채택된 최적 임계값을 나타낸다.

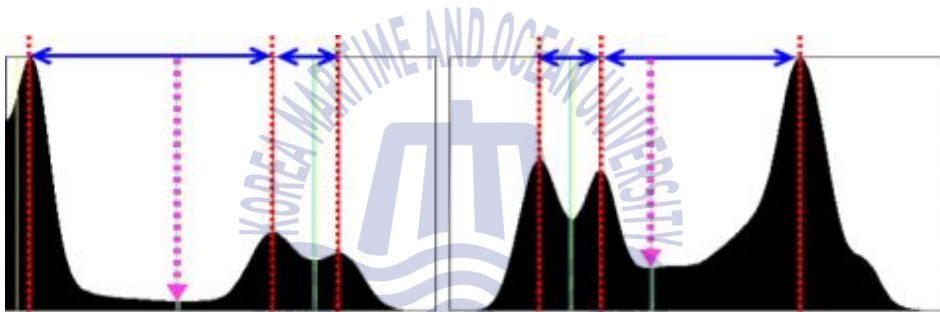


Fig. 35 Assignment of optimal threshold for three-peak histogram

3.3 구획화를 이용한 국부 이진화

하나의 영상에 단 한 개의 임계값만 사용하는 전역 이진화(global binarization)를 하는 것은 매우 이상적인 것으로, 주어지는 팩아이스 영상이 완벽한 경우 사용된다. 하지만 대부분 영상은 빛이나 색상의 불균일로 인해서 결코 완벽하지 않으며 이로 인해 부적절한 영상분석 결과가 도출될 가능성이 높다. 본 연구에서는 불완전한 영상을 해결하는 방법으로 전체 영상을 작은 영상으로 구획화하여 각 구획 영상에 다른 임계값을 적용하는 국부 이진화(local binarization)를 활용한다.

Fig. 36은 주어진 영상(좌측상단)을 2x2 소(小)영상으로 구획화하는 국부 이진화 프로세스를 나타낸다. 좌측 위 그림을 보면 영상에 그림자가 드리듯 짙은 밴드가 존재함을 알 수 있다. 먼저 전체 영상이 소영상으로 구획화되고, 다음 각 소영상이 다른 임계

값을 이용하여 이진화된다. 마지막 과정에서 각 소영상의 국부이진화 결과가 결합되는 순서로 진행된다.

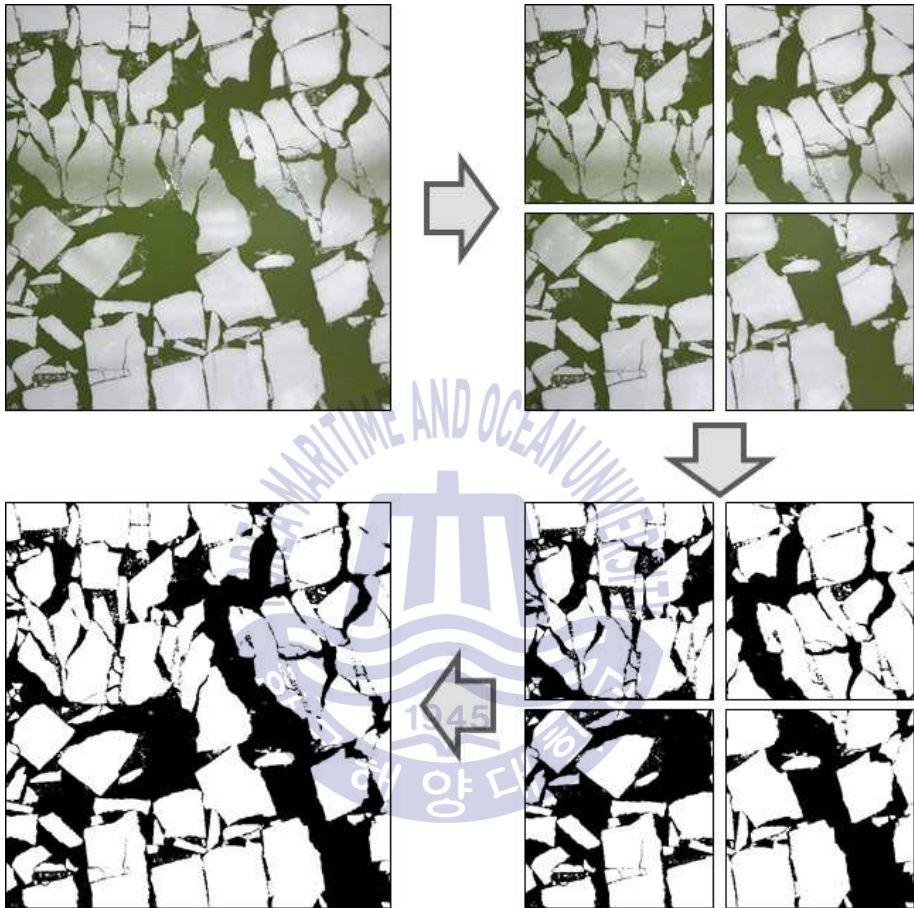


Fig. 36 Local binarization process using subdivision

Fig. 37은 영상 구획화의 효과를 나타내고 있다. 왼쪽 영상은 전역 이진화 결과이며, 오른쪽은 3*3 구획 영상을 통한 국부 이진화 결과이다. 점들은 이진화 과정에서 불확실 영역을 나타내는데, 왼쪽 영상에서 점들이 매우 많이 분포되어 있는 반면, 오른쪽 영상에서 점들 분포가 줄어든 것을 알 수 있다.

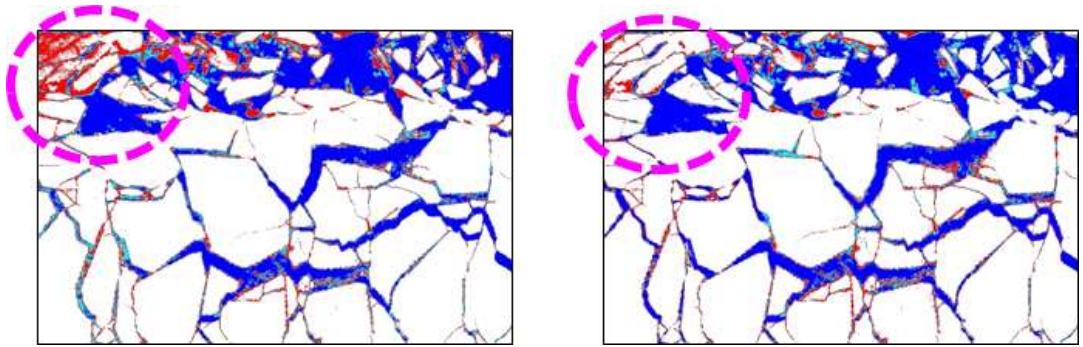


Fig. 37 Comparison uncertainty area of from global(left) and local binarization(right)

Fig. 38은 구획화 기법이 적용된 효과를 설명하며, 우측상단 그림은 전역(global) 이진화에 의한 결과로 그림자가 발생한 영역의 픽아이스를 정확히 이진화하지 못하는 반면, 우측하단 그림은 3x3 구획 영상으로부터 국부 이진화한 결과로 그림자가 발생한 영역의 픽아이스도 정확하게 분류되는 결과를 보인다.

결과적으로 국부 이진화를 통해서 빛의 불균일이나 색상차로 발생할 수 있는 문제를 해결할 수 있다. 하지만 이때 적절한 구획 영역 및 횟수에 설정이 선결되어야 하는 조건이 남는다. 다음 장에서 자동 구획화 방법을 설명하도록 한다.

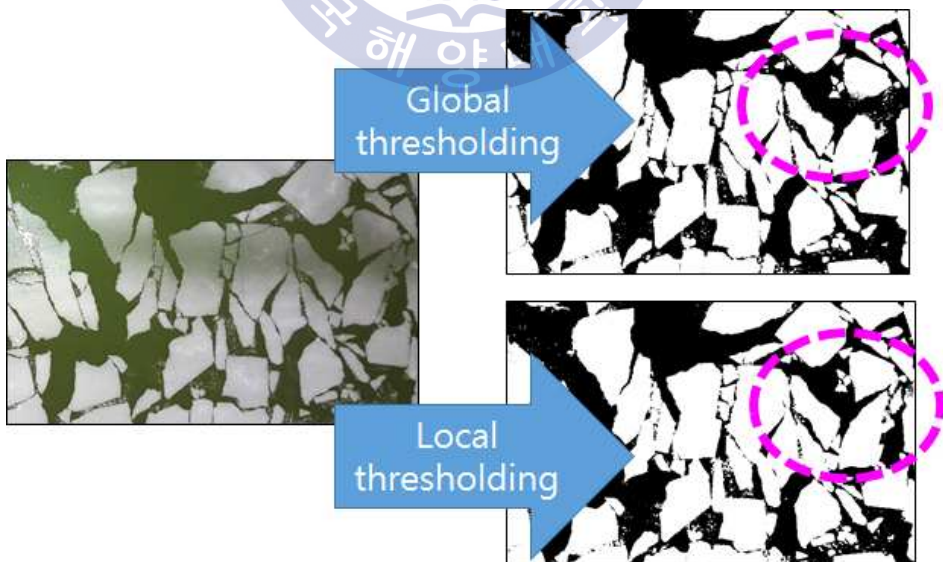


Fig. 38 Comparison of results from global(top) and local binarization (bottom)

제 4 장 쿼드트리 분할을 활용한 알고리즘

4.1 쿼드트리 개념

쿼드트리(quadtree)란 부모 노드(node)를 4개의 자식 노드로 분리하는 데이터 트리 구조이다. 쿼드트리는 영상 분리를 위한 이미지 프로세싱 분야에 널리 적용되고 있다 (Kelkar & Gupta, 2008). Fig. 39는 한 사각형이 분리되는 쿼드트리의 개념을 나타낸다.

본 연구는 쿼드트리 개념을 활용하여 자동 구획화 알고리즘을 개발한다.



Fig. 39 Concept of quad-tree

4.2 개발 알고리즘

구획화를 통한 국부 이진화를 위해서는 영상 분할 방법 및 횡수 설정이 필요하다. 후속 영향을 제대로 고려하지 않은 분할 방법 및 횡수 설정은 오차를 누적시켜 부정확한 결과를 도출할 가능성이 높아진다.

본 연구에서는 쿼드트리 알고리즘을 적용한 국부 이진화를 통해 영상분석 문제를 해결한다. Fig. 40은 개발 알고리즘의 전체 흐름도를 나타낸다.

히스토그램 분석을 위해서 영상이 입력되고, 분석 후에는 4가지 경우로 분류된다. 만약 완전 1픽크로 분류된다면 1픽크 이진화 알고리즘을 통해서 이진 영상이 추출된 후 누적 이진 영상에 반영된다. 완전 2픽크로 분류된 경우는 2픽크 이진화 알고리즘을 통해서 이진 영상이 추출 및 반영된다.

불완전 1피크로 분류된 영상은, 만약 분석을 위한 최소 픽셀 개수 이상을 갖고 있다면, 쿼드트리 과정을 거친다. 즉 4개의 소영상이 생성되고 그 소영상들은 다시 히스토그램 분석을 위해서 입력된다. 불완전 2피크로 분류된 영상 역시, 최소 픽셀 개수 이상의 영상이라면, 쿼드트리 데이터로 추출되어 재입력 된다. 이때 부적절한 영상은 필터링 후 조건에 만족되면 2피크 이진화 알고리즘을 통해 이진영상이 추출 및 반영된다.

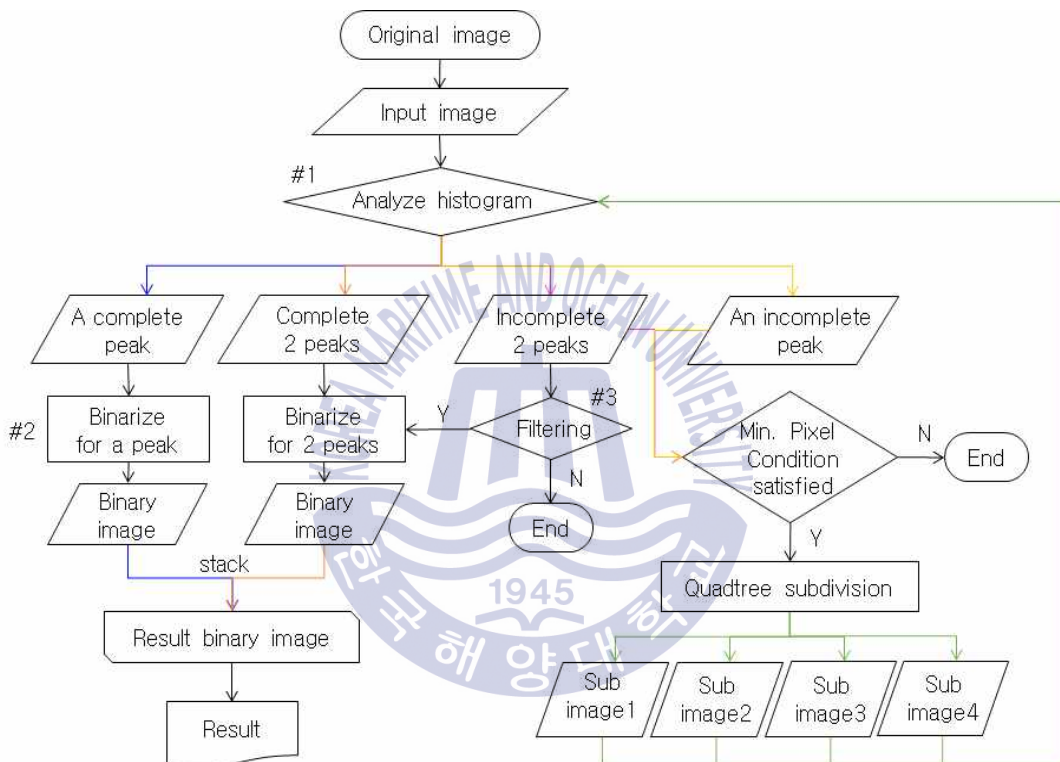


Fig. 40 Flowchart of developed algorithm

개발된 알고리즘은 히스토그램의 피크 분석을 통한 재귀 흐름을 따르므로, 특정 픽셀 수 이하 영상에서는 피크 생성을 위한 정보가 불충분하여 획득된 피크가 부정확할 가능성이 높다. 따라서 최소 픽셀 기준 설정이 필요하다. 본 연구에서는 다량의 오류 발생 영상들을 분석한 결과, 최소 기준을 1,000픽셀로 설정한다.

4.3 히스토그램 분석 및 피크 분류 (#1)

피크를 분류하기 위해서는 히스토그램을 분석하여야 한다. 히스토그램을 분석하기 위하여 먼저 가우시안 블러(Gaussian blur) 함수를 이용해서 영상의 노이즈를 제거한다 (Itseez, 2014). 이후 히스토그램 기준 값 전후 차를 기울기로 정의하는데, 기울기가 증가하다 감소하는 곳을 피크로, 기울기가 감소 후 증가하는 곳을 밸리로 정의한다. 밸리는 한 피크의 끝과 다른 피크의 시작 지점으로 간주한다. 식 (2), (3)은 피크 정보 추출의 수학적으로 표현한다.

$$i'(x) = i(x+1) - i(x-1) \quad (2)$$

$$P(x) = \begin{cases} \text{ridge of peak} & (\text{if } i'(x) > 0, i'(x+1) < 0) \\ \text{end of peak} & (\text{if } i'(x) < 0, i'(x+1) > 0) \\ \text{(start of next peak)} & \end{cases} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 $i(x)$ 는 색조값 x 에서의 픽셀 개수, $i'(x)$ 는 색조값 x 에서 기울기, $P(x)$ 는 피크정보를 의미한다.

Fig. 41은 원본 히스토그램(좌)과 가우시안 블러가 적용된 히스토그램과 피크 및 최저 밸리(MV; minimum valley)(우)를 나타낸다.

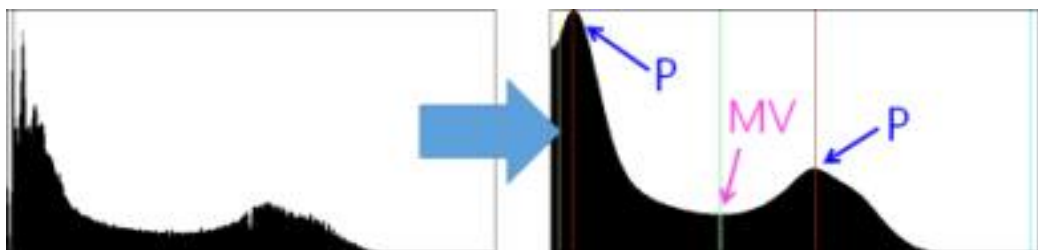


Fig. 41 Effect of Gaussian blur

Fig. 42는 4가지 피크(완전 1피크, 완전 2피크, 불완전 1피크, 불완전 2피크)의 형태를 나타낸다. 완전 1피크는 히스토그램 분포 간격이 $D_{ACP}^{1)}$ 이하인 히스토그램으로, D_{ACP}

는 피크객체 한 개를 포함하는 영상들을 분석하여 도출하였다.

완전 2피크는 피크가 2개 이상 존재하고, 밸리 구간의 평균 빈도수가 F_{CPS}^2 이하, 피크 간 간격이 I_{CPS}^3 이상인 경우다. 밸리 구간의 평균 빈도수는 수정될 수 있으며, 이 수치에 의해서 정확도와 소요 시간을 조절할 수 있다. 피크 간 간격 수치(I_{CPS})는 완전 2피크 영상들을 분석하여 도출하였다.

불완전 1피크는 얼음과 물을 나타내는 피크가 구분되지 않는 것으로 피크가 1개 존재하며, 완전 1피크 조건을 만족하지 못하는 것이다. 불완전 2피크는 2개 이상의 피크가 존재하지만 완전 2피크 조건을 만족하지 않는 것을 지칭한다.

본 연구에서 선정된 수치들(D_{ACP} , F_{CPS} , I_{CPS})은 다량의 영상분석을 통해 통계적으로 얻어진 값들로서 영상이 촬영된 장소의 환경 및 설비에 따라 변경될 수 있다.

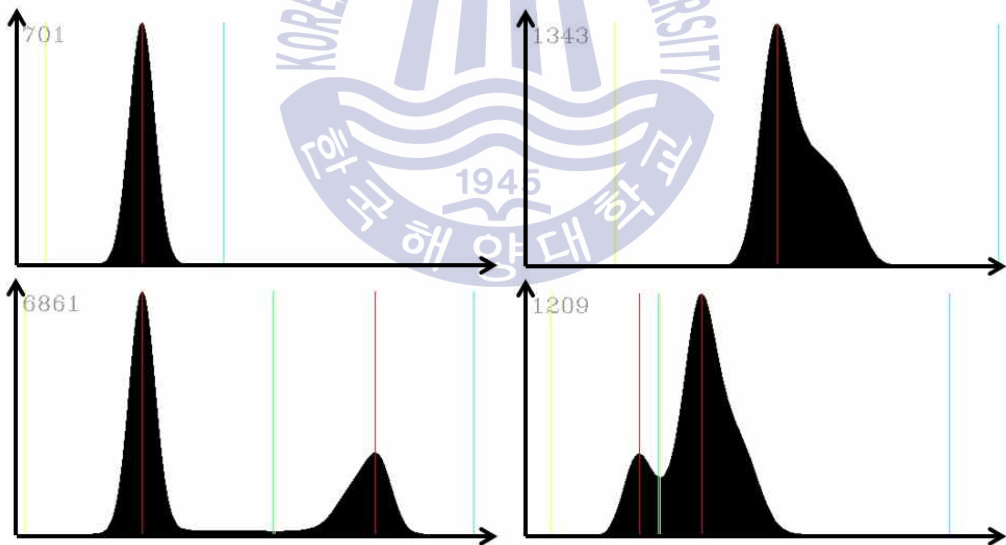


Fig. 42 Histograms of a complete peak (left-top), an incomplete peak (right-top), two complete peaks (left-bottom) and two incomplete peaks (right-bottom)

-
- 1) D: distribution, ACP; a complete peak
 - 2) F: frequency, CPS: complete peaks
 - 3) I: interval

4.4 1피크 히스토그램 영상 분석 (#2)

히스토그램 분석을 통해서 완전 1피크 히스토그램으로 분류된 영상은 한 개의 객체만 있으므로 두 개의 객체를 분리시키는 임계값 활용 이진화(binazirization) 기법 적용할 수 없다. 이 객체가 팩아이스인지 물인지 구분하는 특수한 방법이 필요한데 본 연구에서는 영상 주변의 색조값을 분석하는 전략을 택한다.

Fig. 43에서 1피크 영상 (분석)에 대한 픽셀 맵을 표현한다. ①은 개발된 알고리즘의 히스토그램 분석을 통해 완전 1피크로 분류된 영역이다. 이 영상과 주위 영역의 색상차 비교를 위해 이 영상 주위 상하좌우로 2픽셀씩 확장한 ②영역을 먼저 분석한다. ②영역에서는 영역 경계에 물이 조금만 나타나있어 ①영역과의 색상차가 명확하지 않으므로 비교 대상으로 부적절하다. 추가 확장한 ③영역에는 물이 확실히 존재하므로 ①영역의 색상차를 비교가 가능하다.

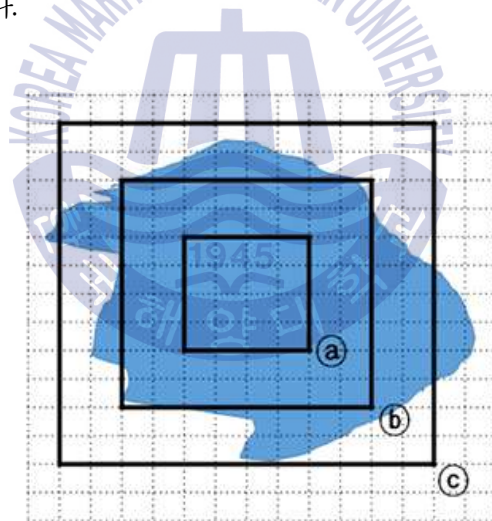


Fig. 43 Pixel map of single-peak image(①) and extended area for comparison analysis(②, ③)

위의 확장 비교방식을 기반으로 하여, Fig. 44에서 1피크 히스토그램 영상을 위한 이진화 프로세스를 나타낸다. 먼저 1피크 히스토그램 영상을 기준 영상으로 초기 분석 영역(영상)을 설정하여 색조값 분포 길이를 계산한다. 만약 색조값 분포길이가 100 미만이면 분석 영역을 확장하여 색조값 분포길이를 재측정하여 다시 비교한다. 색조값 분포길이가 100 이상이라면, 이 색조값 분포 영역에서 기준 영상 히스토그램 피크의 상대위치

를 계산한다. 만약 상대 위치가 60보다 크면 팩아이스로, 40보다 작으면 얼음으로 이진화한다. 이경우가 아닌 때에는 다시 분석 영상을 확장하여 재분석한다.

다량의 영상분석을 통해 본 연구에서는 분포길이 조건을 100이라고 설정한다.

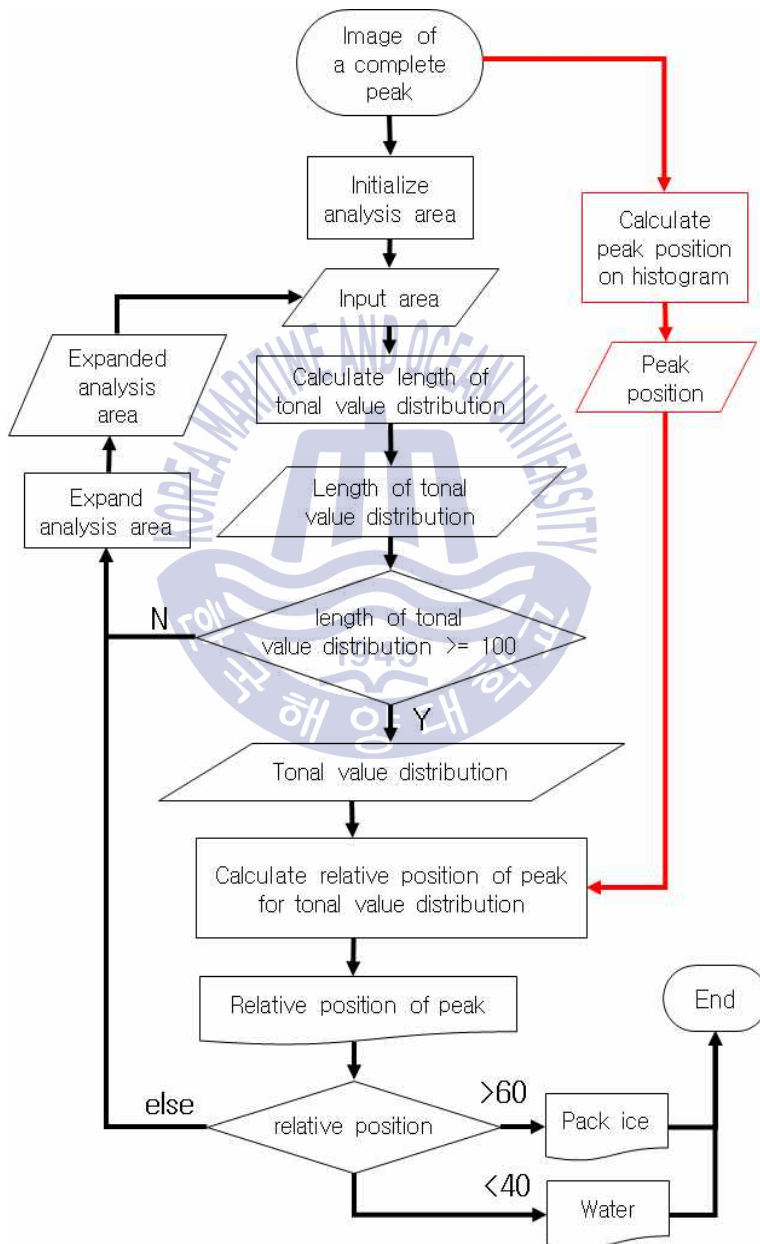


Fig. 44 Process of binarization for image of a complete peak

Fig. 43의 ㉔영역과 같이 완전 1피크 히스토그램으로 분류된 영상의 히스토그램(Fig. 45 상)과 ㉔영역과 같이 확장된 비교 대상 영상의 히스토그램(Fig. 45(a) 하)을 비교한다. 완전 1피크 히스토그램 영상은 1개의 객체만 가지므로 히스토그램(Fig. 45(a) 상)이 좁게 분포되어 있는 반면, 확장된 비교 대상 영역에는 2가지 객체가 포함되도록 하였기에 히스토그램(Fig. 45(a) 하)이 HD만큼 넓게 분포된다. 완전 1피크 히스토그램의 피크 상대 위치(RP)는 비교 대상 영상의 히스토그램 분포에서 79%로 우편향된다. 이는 피크가 상대적으로 밝음을 의미하는 것으로 이때 피크는 팩아이스로 구분된다. Fig. 45 (b)는 Fig. 45 (a) 반대로 피크가 좌편향된 경우이며 상대적으로 어두운 객체인 물로 간주한다.

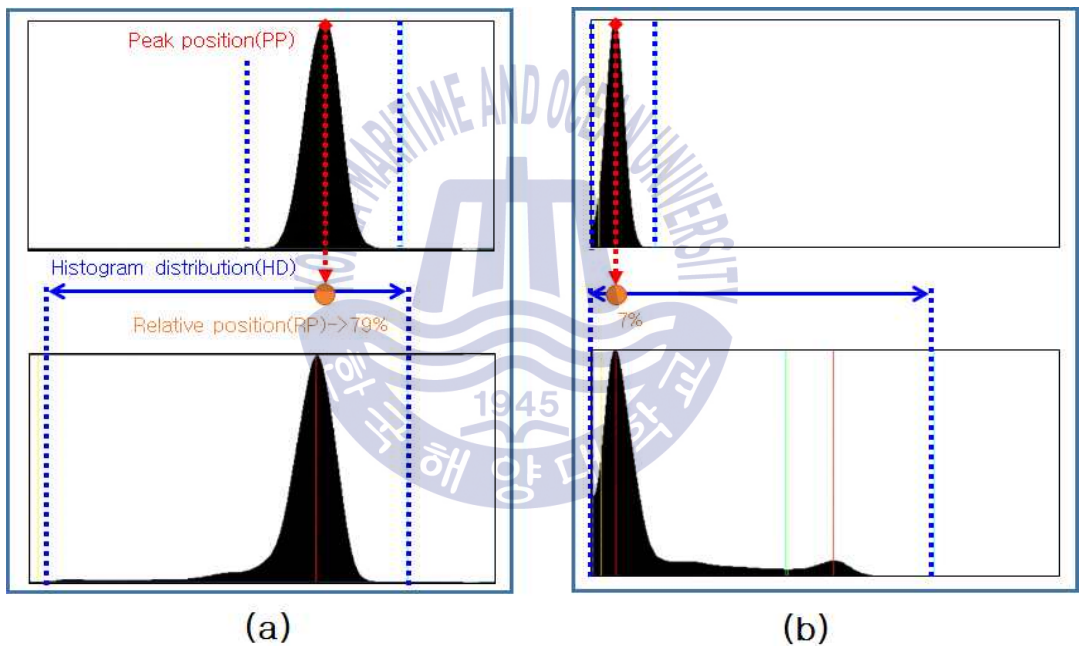


Fig. 45 Histograms of a single-peak image(top) and an extended image(bottom) which is binarized as pack ice(a), water(b)

제한된 객체분리 방법을 통해서 한 개의 객체만 존재하는 영상에서도 객체 구분이 가능하도록 한다. 이는 기준 영상을 주위 국부영역과 비교하여 분석하므로 전체 영상에 분포되어 있는 빛의 불균일이나 색상 차로부터 발생하는 오류 발생을 방지하는 효과를 낸다.

4.5 2피크 히스토그램 영상의 필터링 수행 (#3)

이진화를 사용하기 위해서는 팩아이스와 물을 나타내는 피크들이 명확하게 분리되어야 하지만 간혹 피크가 2개 이상임에도 불구하고 이 피크들이 모두 팩아이스만 (또는 물만) 나타내는 경우가 발생한다. 즉 발견된 2개 피크가 모두 팩아이스만(또는 물만) 나타내고 상대 대상물인 물을(또는 팩아이스를) 위한 피크가 없는 경우다. 이런 경우는 불완전 1피크 히스토그램과 유사한데, 팩아이스와 물 분리를 위한 임계값을 찾을 수 없다. 이와 같이 완전 2피크 히스토그램 영상이 이진화를 위해 부적절한 경우가 발생할 수 있으며 이 경우를 위해 사전 필터링 작업을 수행한다.

예로 Fig. 46에는 분명 2개 이상의 또렷한 피크가 존재하지만 이 2개의 피크는 모두 팩아이스를 나타낸다. 물을 나타내는 피크는 왼쪽의 점선 동그라미가 있는 부근에 존재해야 하지만 존재하지 않는다.

본 연구에서는 첫 번째 피크의 상대 위치가 히스토그램 분포 영역에서 왼편 40% 이내, 마지막 피크의 상대 위치가 히스토그램오른편 40% 이내에 위치하지 않는 경우의 영상을 이진화 작업을 수행하지 않고, 이 영상은 불완전 2피크 재분류한다.

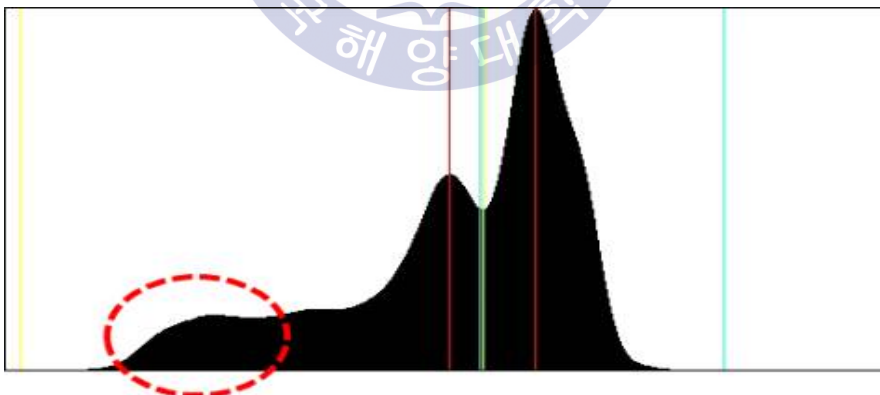


Fig. 46 Ambiguous histogram for binarization

제 5 장 개별 면적 분포도

5.1 중첩 팩아이스 분리

영상 처리 분야에서 개별 물체를 추출하기 위해서는 라벨링(labeling) 기법 등을 활용하여 쉽게 객체를 분리할 수 있다. Fig. 47에서 객체 라벨링 기법의 과정을 나타낸다. 왼쪽 원본 영상을 라벨링 기법을 적용하여, 4개의 객체로 분리된 영상을 얻을 수 있다.

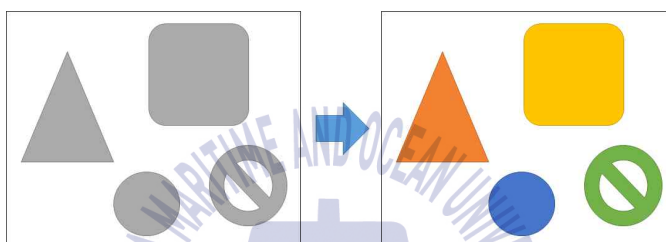


Fig. 47 Concept of labeling

일반적인 대상물은 위와 같이 라벨링 기법을 통해서 추출이 가능하지만, 빙해수조에 분포되어 있는 팩아이스들은 겹쳐져있는(overlap) 상태로 분포되어 있으므로 보편적인 객체 추출 기법이 활용될 수 없다. Fig. 48은 라벨링에 의한 객체가 추출된 모습을 설명하며, 좌측 사진에 여러 개의 팩아이스들이 서로 겹쳐져 분포되어 있고, 우측 사진에서 라벨링 결과를 나타냈다. 라벨링 기법은 객체가 연결되어만 있다면 한 개의 객체로 판단하므로, Fig. 48(좌) 영상을 라벨링하게 되면 3개의 팩아이스로 분리된 영상(우)이 된다. 하지만 실제로는 여러 개의 팩아이스이므로, 개별 분리 알고리즘이 요구된다.

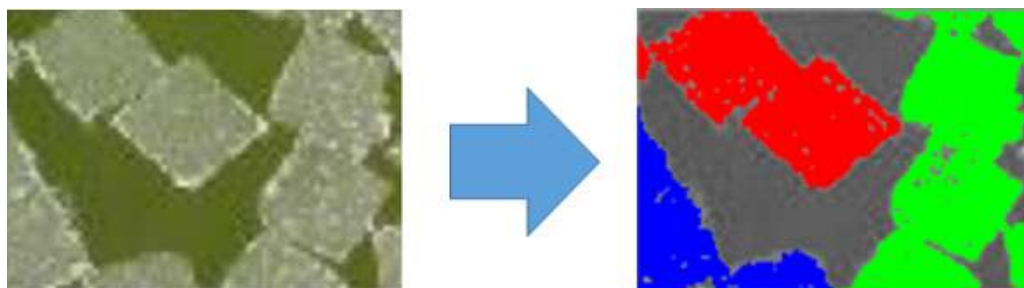


Fig. 48 Individual pack ice extraction by labeling

5.2 워터셰드 개별 추출 알고리즘

Fig. 49는 객체 개별 분리를 위한 워터셰드(watershed) 알고리즘 프로세스를 나타낸다. 최초 입력된 원본 영상은 이진화(#4)를 통해 이진영상이 추출되고, 그로부터 엣지 검출(#5)과 씨드(seed) 윤곽 추출(#6)을 통해서 엣지 및 씨드 윤곽 영상이 도출된다. 이 영상들이 합쳐진 마커 영상과 원본영상은 워터셰드 알고리즘의 초기 값으로 입력되고 최종적으로 개별 객체 추출 영상이 도출된다.

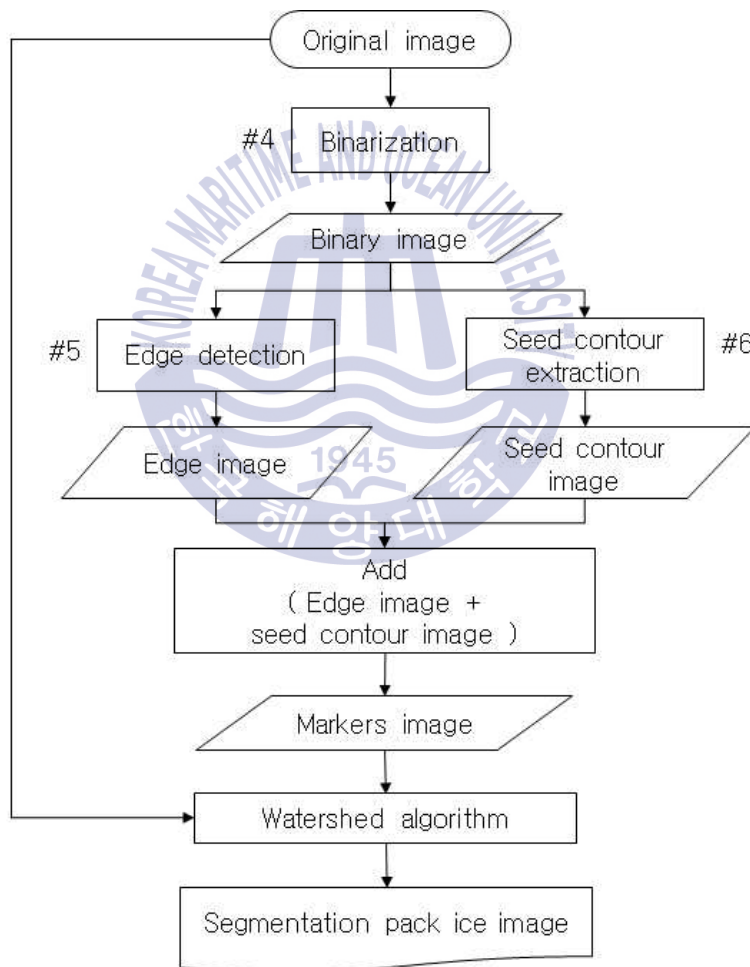


Fig. 49 Watershed segmentation algorithm

5.3 워터셰드를 활용한 개별 픽아이스 추출 알고리즘

본 연구는 #4 과정을 위해 4장의 쿼드트리를 활용한 국부 이진화 개발 알고리즘을 활용하며, 이는 픽아이스 영상의 색상 차나 빛 불균일에 의한 영향을 최소화시켜 픽아이스와 물을 분리시키는 최상의 이진 영상을 도출할 수 있다.

#5의 엣지 검출을 위해서 라플라시안(laplacian) 엣지 검출 기법이 활용하며, 이는 영상 2차원 미분(derivative)을 활용하는 기법으로 양방향 분포를 갖는 픽아이스 엣지 추출에 적합하다. Fig. 50은 원본영상(좌)으로부터 1차 미분(중간)과 2차 미분(우)에 의한 추출된 엣지의 차이를 설명하며, 1차 미분에서는 한 방향 엣지만 추출되는 반면, 2차 미분에서는 양방향 엣지 모두를 추출하고 있다.



Fig. 50 Primary(mid) and secondary(right) derivative edge of original image(right)

Fig. 53은 #6의 씨드 윤곽 추출 알고리즘을 나타낸다. 본 연구에서는 근접 분포되어 있는 픽아이스를 명확히 구분하기 위해 이진 영상에서 픽아이스를 나타내는 흰 영역을 축소시키는 모폴로지 침식(morphology erode) 효과를 적용하고, 이를 distance transform에 적용한다. Fig. 51은 모폴로지 침식 적용 전과 후를 나타내며, 적용 후에 근접 얼음들이 명확히 구분되어지고 있다.



Fig. 51 Binary image(left) and morphology erode image(right)

Fig. 52은 Fig. 50의 원본영상(좌)에 distance transform 적용 영상이다.

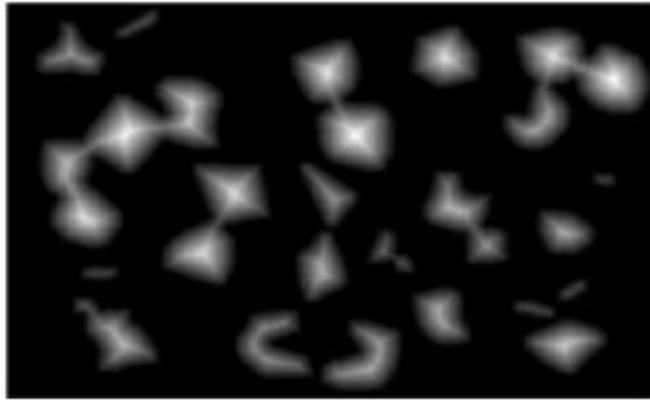


Fig. 52 Example of distance transform

이후 보편적으로 전역 이진화(global binarization)를 이용하여 외곽에서 충분한 거리를 갖는 글로벌 피크만을 추출하는데 이는 객체가 일정한 크기로만 존재할 때에만 적합하다. 팩아이스는 매우 다양한 크기로 분포되어 있으므로 본 연구는 추가적으로 국부 최대 검색(local max finder)을 수행하여 크기와 무관하게 객체를 인식할 수 있도록 한다.

Fig. 53은 전역 이진화와 국부 이진화에 분리를 비교하며, 원본(좌), 국부 이진화에 의한 분리(중간), 전역 이진화에 의한 분리(우) 영상을 나타낸다. 전역 이진화에 의한 분리 영상에서는 작은 객체들을 인식하지 못하고 있는 반면, 국부 이진화에 의한 분리 영상에서는 작은 객체들도 정확하게 인식하고 있다.

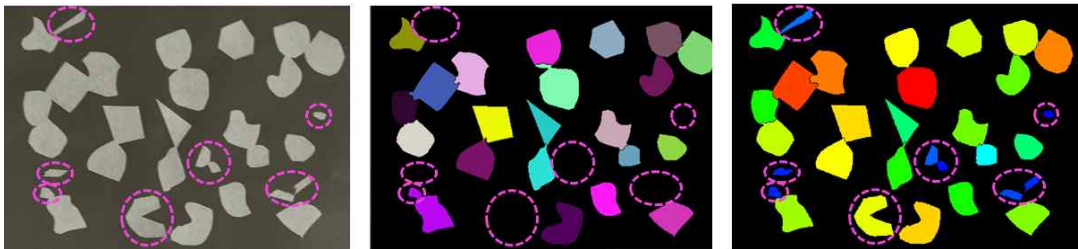


Fig. 53 Original(left), segmentation with global binarization(mid), with local binarization(right)

최종적으로 로컬 피크 영역을 추출하고 이를 글로벌 피크와 병합하여 씨드 영상으로 정의하고, contour finder(Suzuki, 1985)를 통해서 씨드 윤곽 영상을 추출한다.

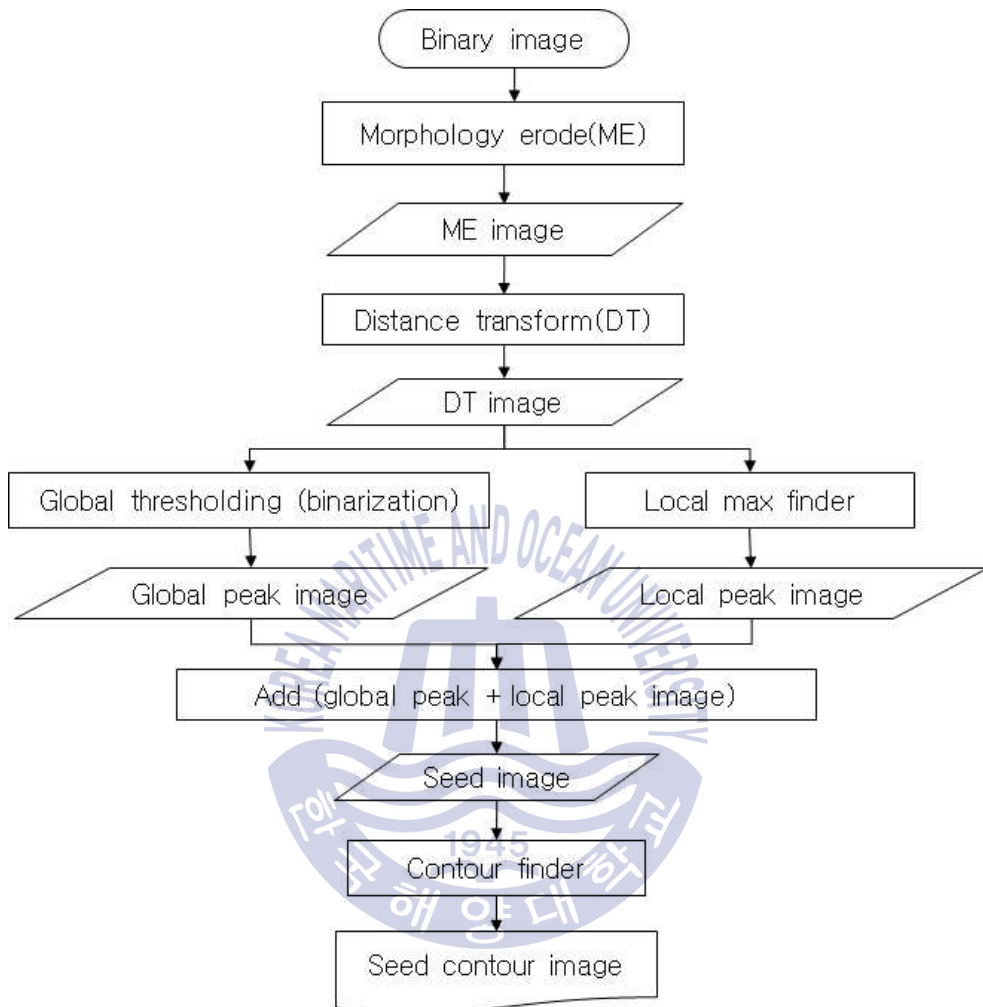


Fig. 54 Seed contour extraction algorithm

제 6 장 예제

6.1 국부 이진화 개발 알고리즘 효과

쿼드트리를 이용한 국부 이진화 알고리즘에 의한 효과를 검증하기 위해서 전역 이진화 결과와 비교하였다. Fig. 55는 원본(상)과 전역 이진 결과(하)를 보이며, Fig. 56 (상)은 개발 알고리즘 적용 후 결과를 나타낸다. 전역 이진화 결과 영상을 보면 오른쪽에 조명 밝기가 충분하지 않아 팩아이스를 정확히 찾아내지 못하지만, 개발 알고리즘은 이 문제를 잘 처리함이 보인다. Fig. 56(하)는 알고리즘이 적용될 때 자동적으로 분할된 소 영상 영역을 표현한다.

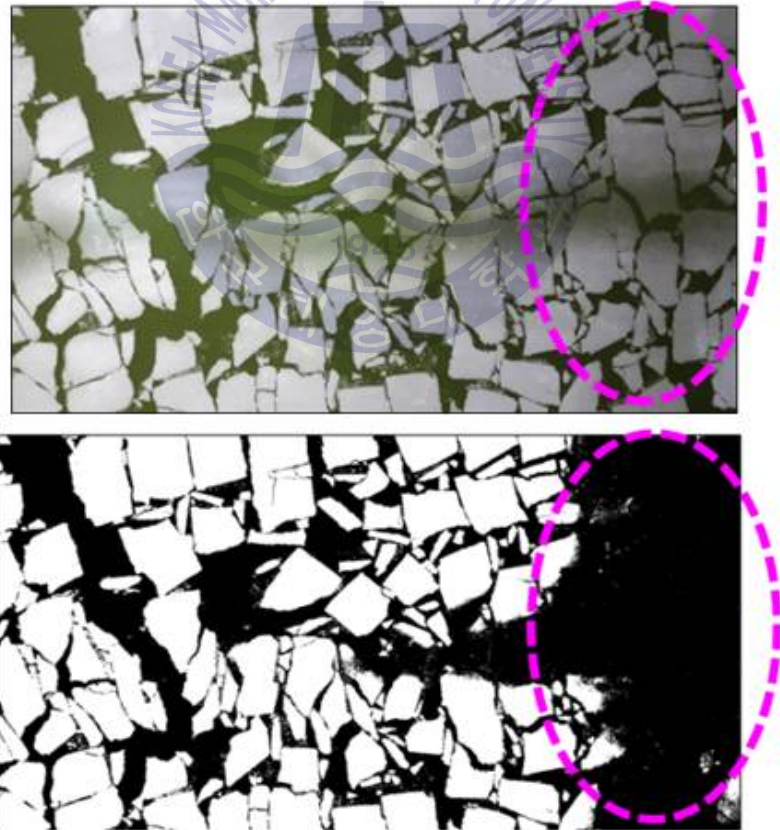


Fig. 55 Original image(top) and result of global binarization(bottom)

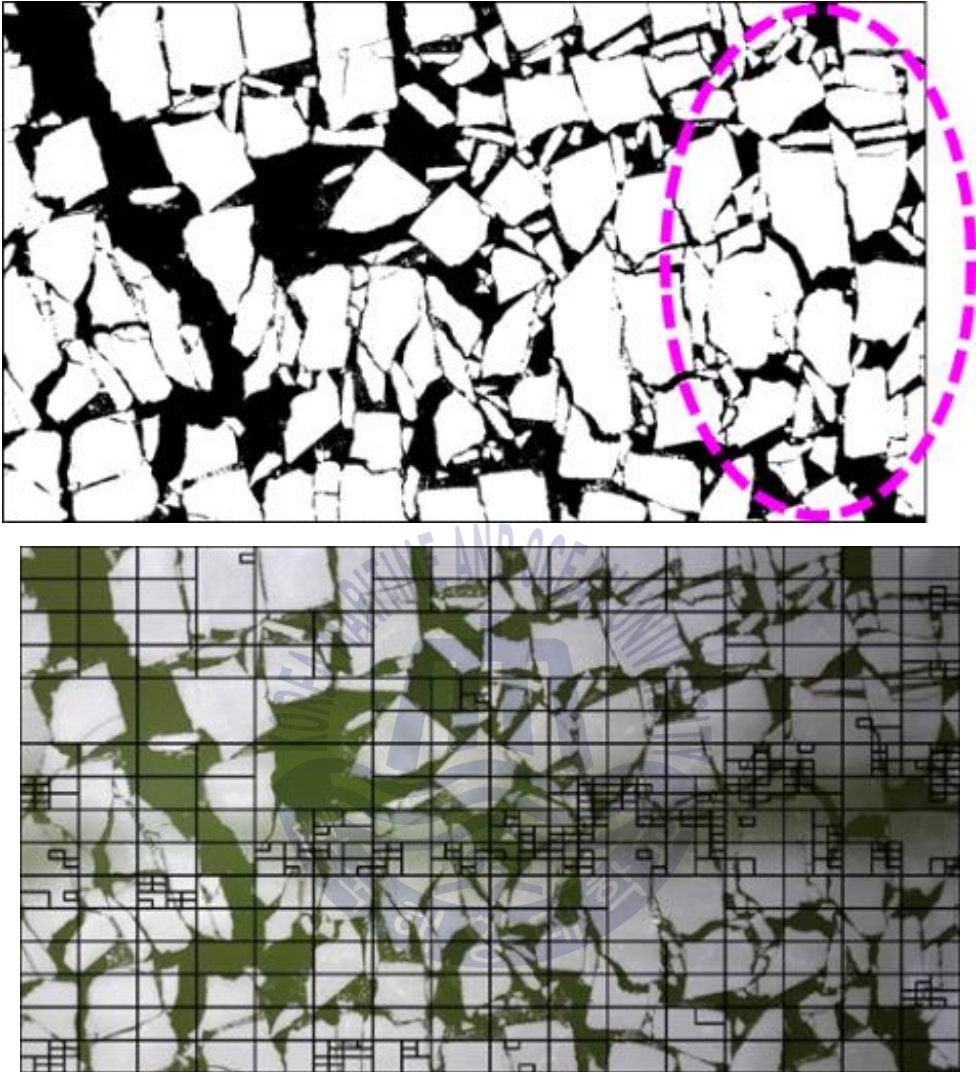


Fig. 56 Result of developed algorithm(top) and quadtree subdivision(bottom)

Fig. 57은 다른 영상의 적용 예를 나타낸다. 전역 이진화 결과 영상(우측상단)을 보면 왼쪽 구석에서 픽아이스를 정확히 구분하지 못하지만, 개발 알고리즘 결과 영상(우측하단)에서는 보다 향상된 결과를 보인다. 여기의 픽아이스는 크기가 작고 여러 색상으로 구성되어 있으므로 조밀한 분할이 필요하다. 개발 알고리즘은 입력 영상에 맞는 최적 분할 조건을 찾고 그 분할 영상을 분석하여 우수한 이진 결과 영상을 도출하는 것으로 판단된다.

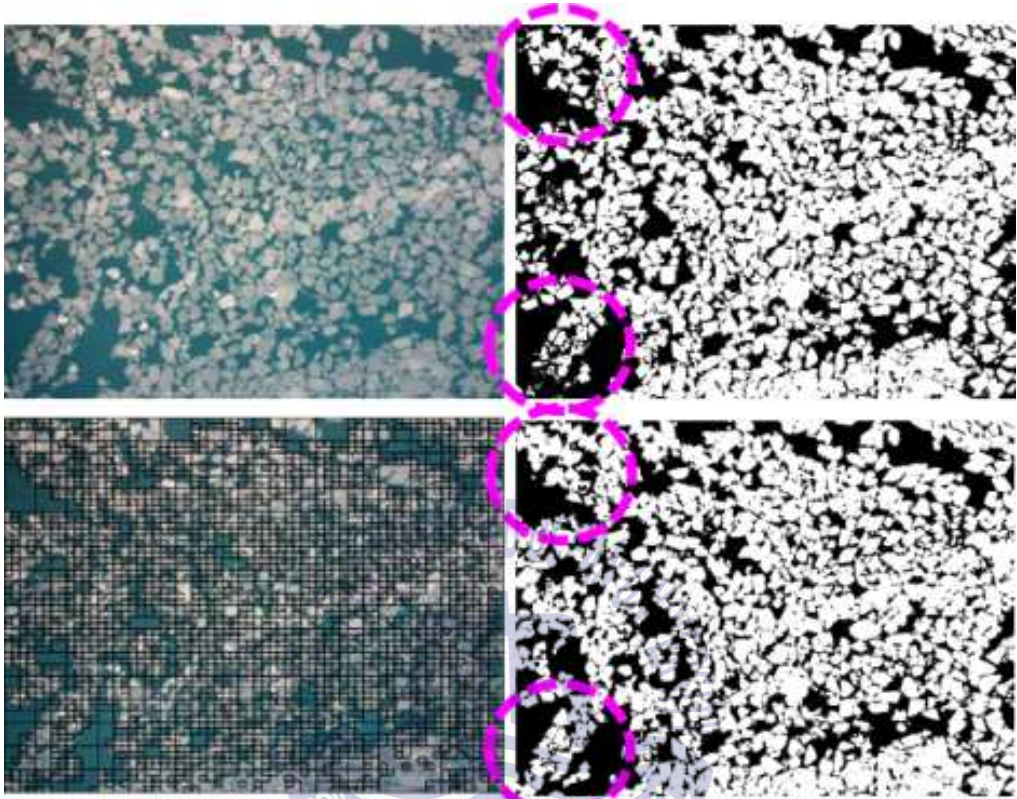
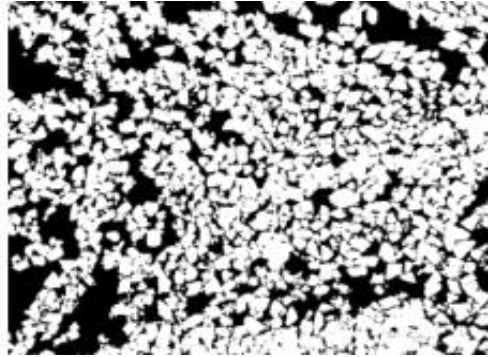
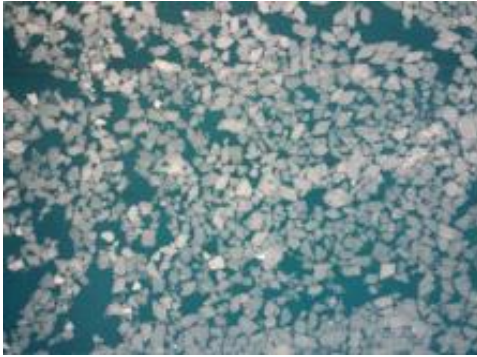


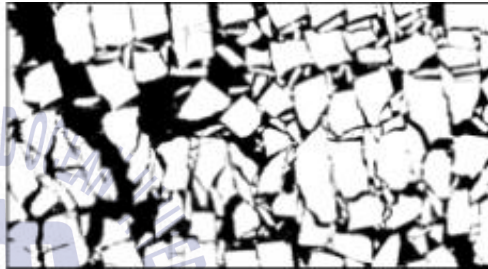
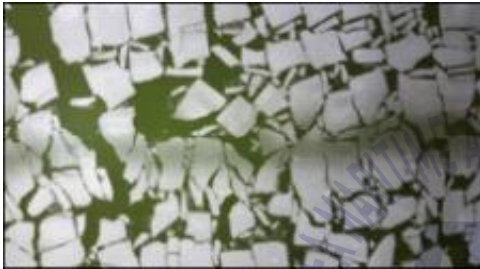
Fig. 57 Original image (left-top), quad-tree subdivision (left-bottom), result of global binarization(right-top), result of developed algorithm (right-bottom)

6.2 국부 이진화 개발 알고리즘을 이용한 집적도 측정

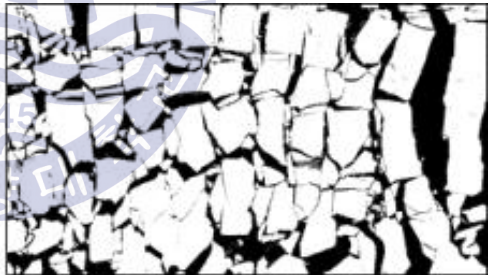
개발 알고리즘을 통해서 선박해양플랜트연구소(KRISO) 빙해수조에서 촬영된 팩아이스 영상의 집적도를 측정했다. 촬영된 대부분 영상은 천장의 조명으로 인한 빛 불균일 현상을 포함한다. Fig. 58은 원본 영상(좌)과 개발 이진화 알고리즘 적용 결과 이진영상(우)을 나타내고, Table 1은 분석된 영상의 크기와 집적도 결과를 나타낸다.



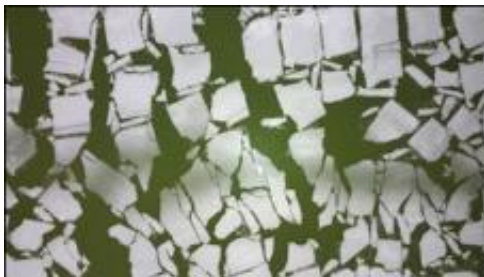
test image #1



test image #2



test image #3



test image #4

Fig. 58 Results for different pack ice images

Table 1 Results of analyzed images

No.	Size	Concentration of pack ice [%]
1	4160 × 3120	61.43
2	4608 × 2592	75.07
3	4608 × 2592	61.31
4	4608 × 2592	69.88

6.3 국부 이진화 개발 알고리즘 정확도 검토

알고리즘의 정확도 확인을 위해 수동 측정한 집적도와 알고리즘에 의해 도출된 직접도를 비교하였다. 시각적으로 팩아이스와 물을 판단하여 집적도를 수동 측정한 결과 70.02%의 직접도가 계산되었다. 알고리즘에 의해 도출된 집적도는 69.88%로 오차는 0.14%포인트로 상당한 신뢰성을 가지는 것으로 판단한다.

6.4 개별 팩아이스 추출 및 면적 분포도

Fig. 59는 모형 제작에 의한 개별 팩아이스 면적 분포도를 나타내며, Fig. 60, 61은 실제 팩아이스 분포에 대한 것을 나타낸다. 각 Fig.에서 원본 영상(좌측상단), 크기별 색상 라벨링 영상(우측상단), 면적별 개수 차트(하)를 나타낸다.

크기는 픽셀 단위로 측정되며, 사용자의 추가적인 길이 초기 값 입력을 통해서 면적 단위로 산출가능하다. 크기별 색상 라벨링 영상은 제일 작은 크기에는 파란색에서부터 청록색, 초록색, 노란색을 걸쳐 제일 큰 크기에는 빨간색이 할당된다. 면적별 개수 차트는 X축에 픽셀 크기에 따라 여러 구간을 설정하고, Y축에 각 구간에 해당하는 크기의 팩아이스 개수를 산출한다.

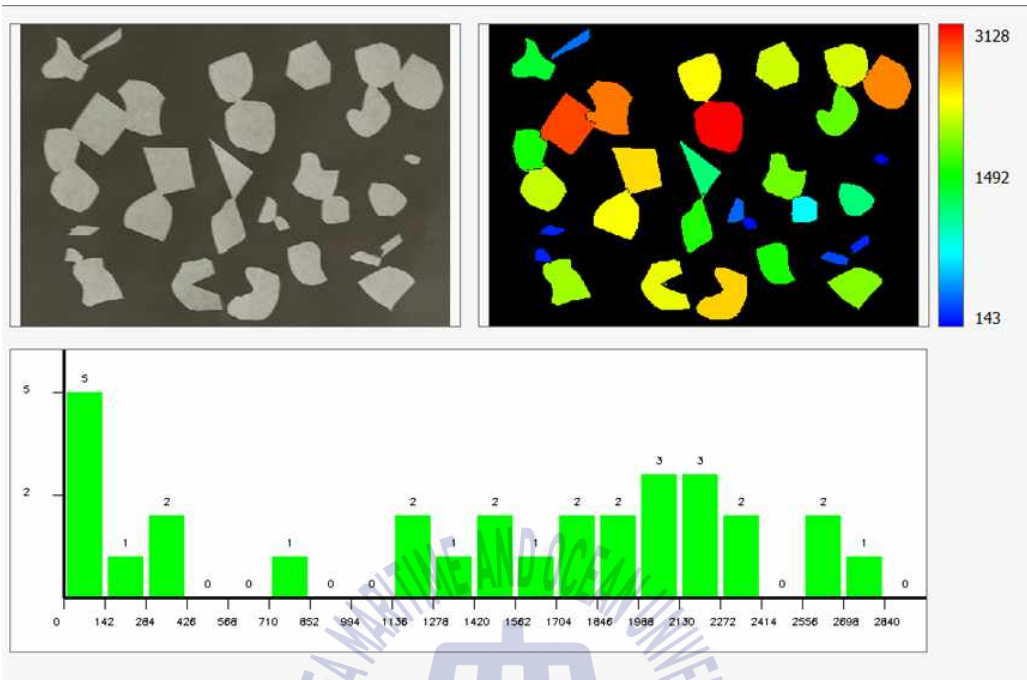


Fig. 59 Example of individual pack ice extraction and area distribution chart (1)

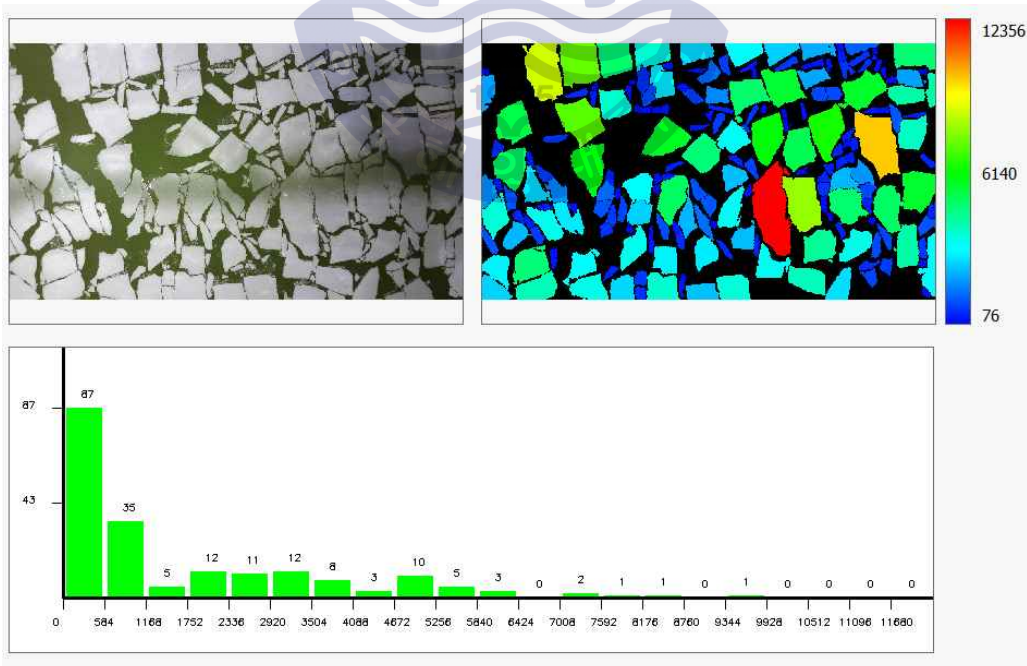


Fig. 60 Example of individual pack ice extraction and area distribution chart (2)

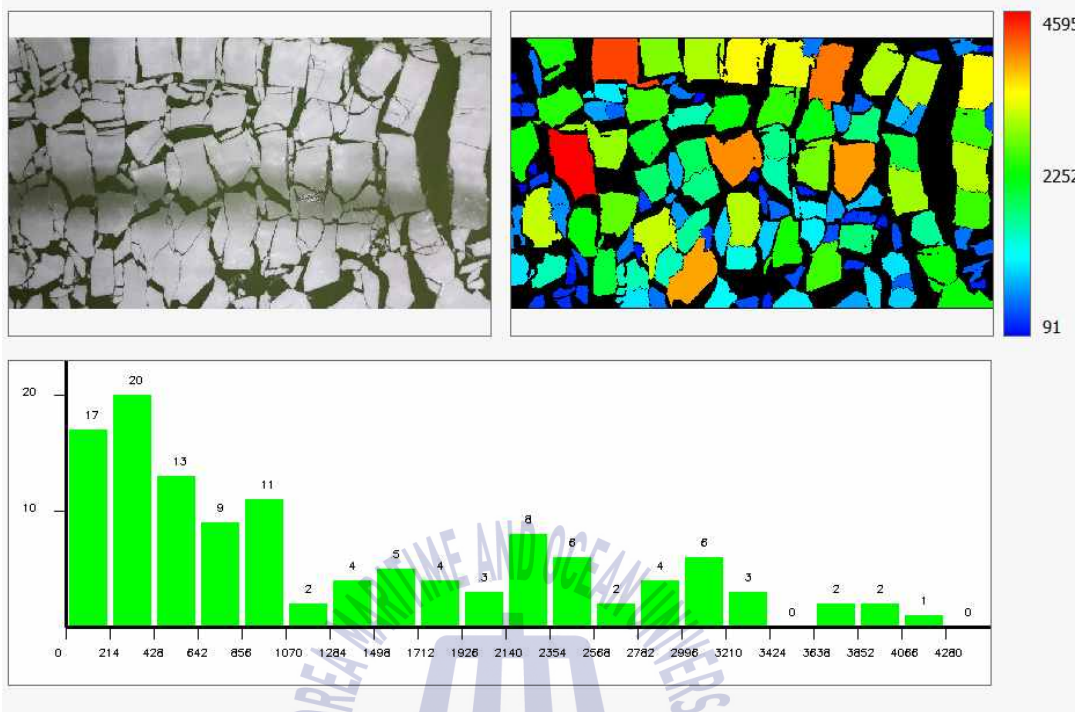


Fig. 61 Example of individual pack ice extraction and area distribution chart (3)

6.5 팩아이스 집적도 및 개별 팩아이스 면적 분포도 측정 모듈

본 연구는 팩아이스 집적도 및 개별 팩아이스 면적 분포도 측정 알고리즘을 개발하였고, 이를 사용자가 보다 쉽고 편리하게 활용하기 위한 그래픽 유저 인터페이스 모듈을 함께 개발하였다.

Fig. 62(좌)에서 영상 회전 및 클리핑(clipping)을 통해서 영상을 편집(좌)하고, 이를 통해 알고리즘 적용을 위한 영상을 생성한다. Fig. 62(우)에서 선택 객체의 길이 및 단위 설정을 수행하고, 이를 통해 집적도나 면적 분포도 결과 값이 면적 단위로 출력가능하게 한다.

Fig. 63에서 색 공간별 히스토그램과 임계값을 분석하며, 각 공간별 전역 이진화를 수행하여 집적도를 측정하고, Fig. 64를 통해서 사용자가 원하는 특정 색공간이나 영상에 대해서 구체적 분석이 가능하게 한다.

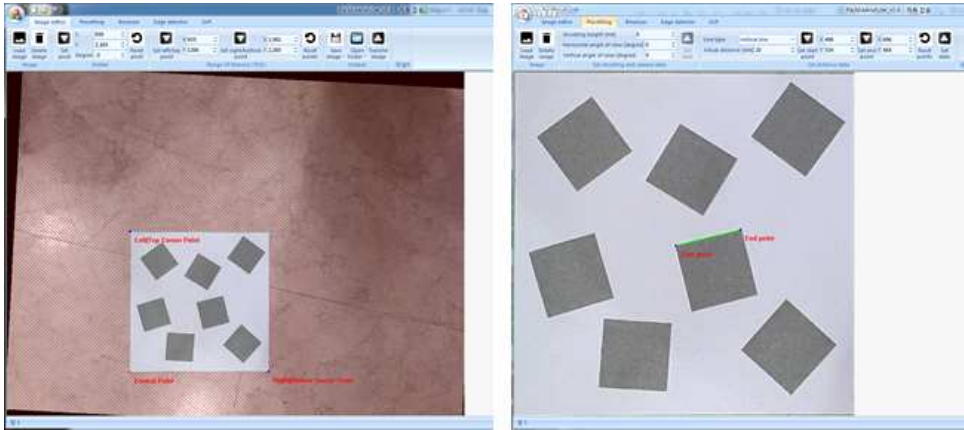


Fig. 62 Image editor(left) and presetting length unit module

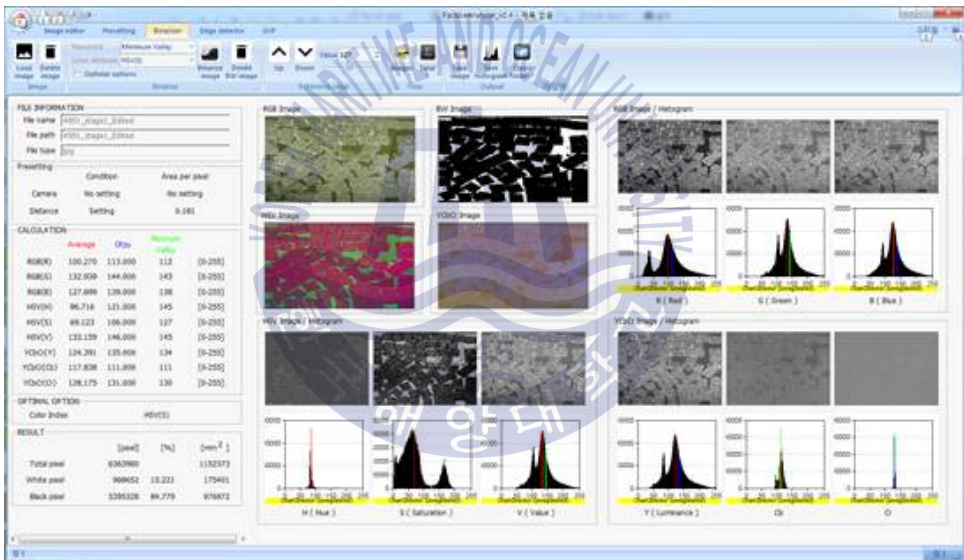


Fig. 63 Histogram, threshold analysis and global binarization module by color space

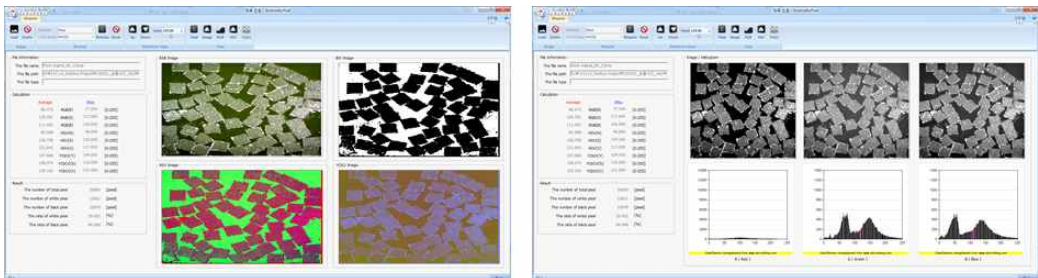


Fig. 64 Image and histogram detail analysis module depending on color space

Fig. 65(좌)에서 개발된 이진화 알고리즘을 수행 및 집적도를 계산하고, Fig. 65(우)에서 결과 이진 영상을 통해 엣지를 추출한다.

Fig. 66에서 원본영상부터 시작해서, 이진, 엣지, 모폴로지, distance transform, 글로벌 피크, 로컬피크, 씨드 윤곽, 마크, 개별픽아이스 영상까지 전체 프로세스를 나열하며, 최종적으로 Fig. 67에서 개별 픽아이스 면적별 라벨링 영상 및 분포도 차트를 출력한다.

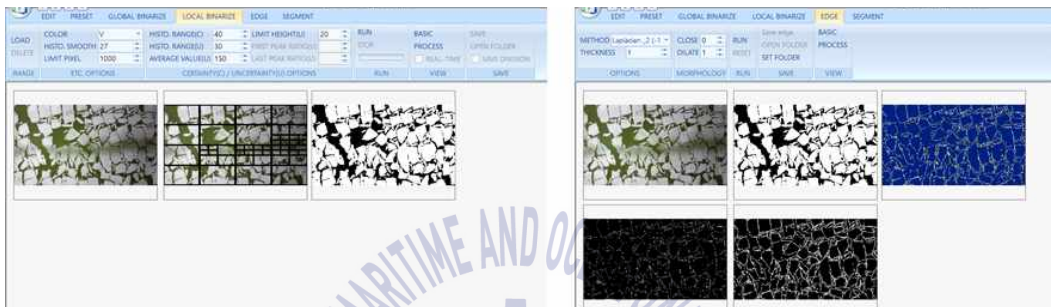


Fig. 65 Calculation of pack ice concentration and local binarization by developed algorithm(left) and edge detection(right)

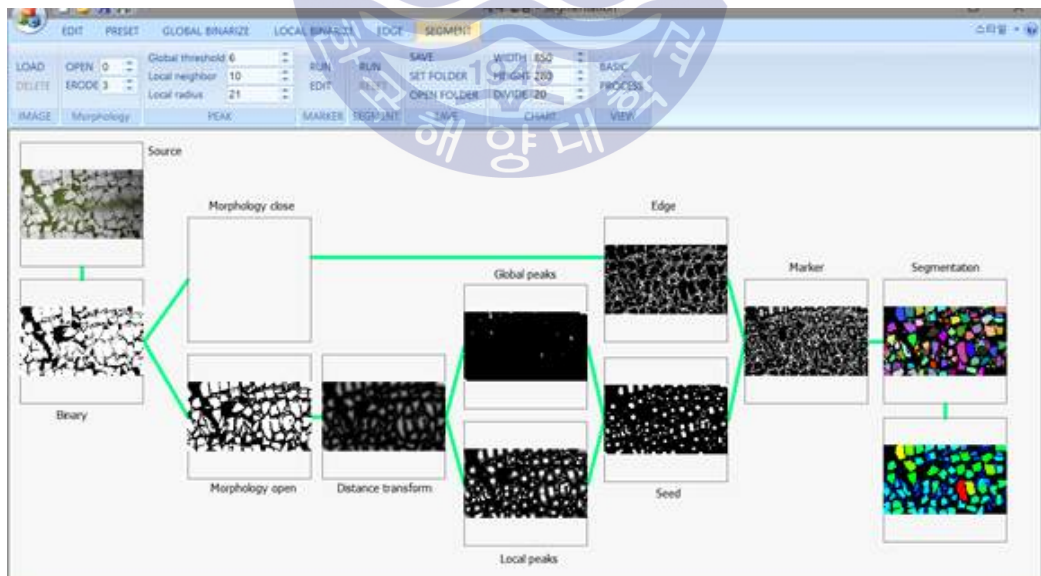


Fig. 66 Entire process Image display module

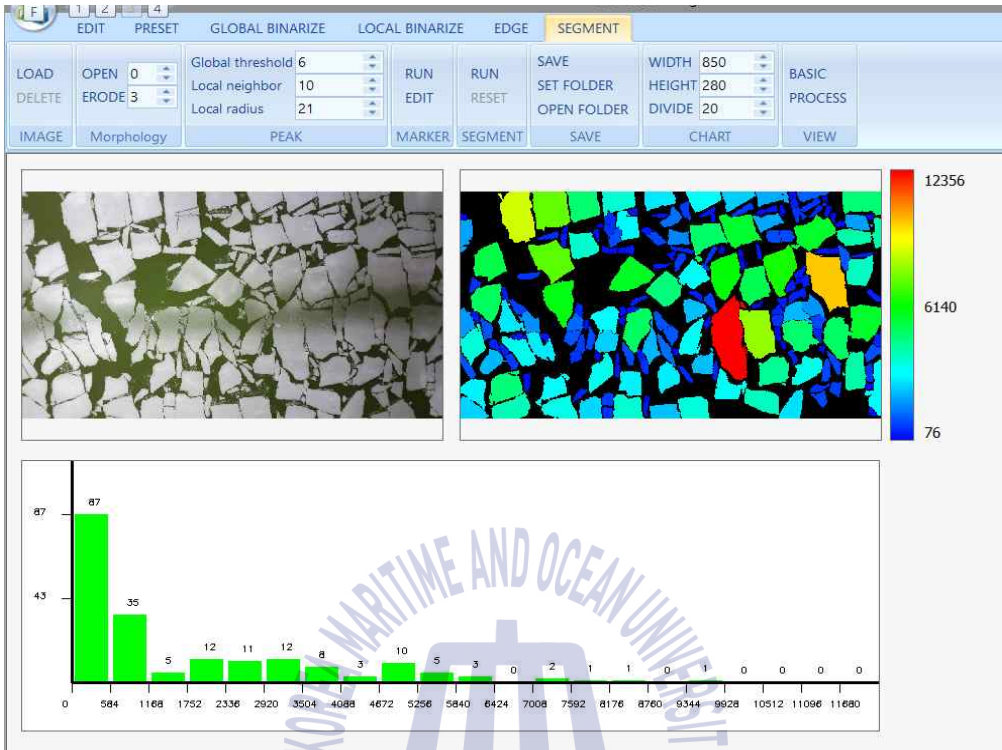


Fig. 67 Labeling image by individual pack ice area and distribution chart output module

제 7 장 결론

쿼드트리를 활용한 국부 이진화 알고리즘을 개발하여 팩아이스와 물을 분리시켜 팩아이스 집적도 측정하고, watershed 객체 분리 알고리즘을 개별 팩아이스 추출에 적합하게 개선하여 팩아이스 개별 면적 분포도를 산출하였다.

팩아이스 영상들의 특징을 분석하고, 여러 가지 발생할 수 있는 히스토그램의 형태를 고려하여 이진화를 위한 최적 임계값을 선택하였다. 빛 불균일이나 색상 차로 인해 발생할 수 있는 문제를 국부 이진화를 통하여 해결하였으며, 쿼드트리 소영상 추출과 각 영상을 히스토그램 형태에 따라 4가지로 분류, 정의함을 통해서 국부 이진화를 자동화하였다. 개발 알고리즘은 빛 불균일이나 색상 차와 무관하게 영상 전체에 걸쳐서 정확한 이진 결과를 도출한다는 것을 확인하였다.

개별 팩아이스 추출을 위하여 초기 값에 의한 민감함을 개선할 수 있는 watershed 알고리즘을 활용하였다. watershed 적용 초기 값을 위해 불균일한 형상의 팩아이스 엣지 추출에 적합할 수 있는 라플레시안 엣지 추출 기법을 통해 엣지를 추출하였고, 근접 팩아이스를 명확히 구분하기 위해 모폴로지 침식(morphology erode) 효과를 적용하였다. 또한 다양한 팩아이스 크기를 모두 인식시키기 위하여 국부 최대 검색(local max finder)을 추가했다.

마지막으로 그래픽 유저 인터페이스 모듈을 개발하여 사용자가 개발 알고리즘을 쉽고 편리하게 사용할 수 있도록 하였고, 또한 영상 편집, 분석, 프로세스 시각화 등의 기능을 통해서 부수적인 편의도 도모하였다.

본 알고리즘은 팩아이스를 동반한 여러 실험에 활용될 수 있으며, 팩아이스 영역을 넘어서 임의형상을 가진 물체를 식별하는 영역까지 확대, 적용될 수 있을 것이다.

향후 기하학적 정사 보정(Geometric orthorectification) 알고리즘을 적용하여 각도 촬영에 대한 변화를 보정하고, 알고리즘을 최적화시켜 팩아이스 동영상 실시간 분석에 적용하는 추가 연구가 필요하다.

참고문헌

- Beucher, S., Lantuejoul, C., Use of Watershed in Contour Detection, International Workshop on image processing, real-time edge and motion detection/estimation, Rennes, France, 17-21 September 1979.
- Byun, S. H., Nam, J. H., Woo, J. H. & Lee, S. J., 2016. An algorithm for analysis of pack ice concentration using image processing technique, The 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, Japan, 21-24 February 2016.
- Cho, S. R., Jeong, S. Y. & Lee, S. S., 2013. Development of effective model test in pack ice conditions of square-type ice model basin, Ocean Engineering, 67, pp.35-44.
- Itseez, 2014. OpenCV 2.4.11.0 documentation.
- Jeong, S. Y., Choi, K. S. & Cheon, E. J., 2015. An Analysis of Characteristic of Ice Load Distribution on Model Ship due to Ship and Ice Interaction, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 52(6), pp. 478-484.
- Johannessen, O. M., Volkov, A. M., Bobylev, L. P., Grischenko, V. D., Sandven, S., Pettersson, L. H., Melentyev, V. V., Asmus, V., Milekhin, O. E., Krovotyntsev, V. A., Smirnov, V. G., Alexandrov, V. Yu., Duchossois, G., Kozlov, V., Kohlhammer, G. & Solaas, G., 2000. ICEWATCH - Real-time sea ice monitoring of the Northern Sea Route using satellite radar. Earth Observation and Remote Sensing, 16(2), pp.257-268.
- Kelkar, D. & Gupta, G., 2008. Improved quad-tree Method for Split Merge Image Segmentation, First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, pp.44-47.

Kim, Y. W., Lim, J. Y., Lee, W. Y., Kim, S. Y., Lim, D. H., Efficient Image Segmentation Using Morphological Watershed Algorithm, The Korean journal of applied statistics, 22(4), pp. 709-721.

Rees, W. G., 2005. Remote Sensing of Snow and Ice.

Suzuki, S. and Abe, K., , 1985. Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following. Computer Vision Graphics and Image Processing, 30(1), pp 32-46.

Zhang, Q., Skjetne, R., Metrikin, I., & Løset, S., 2015. Image processing for ice floe analyses in broken-ice model testing. Cold Regions Science and Technology, 111, pp. 27-38.

