



## 유역분할 알고리즘을 이용한 결정립 크기 측정

김범수<sup>a</sup>, 윤상두<sup>a</sup>, 권재성<sup>a</sup>, 최성웅<sup>a</sup>, 노정필<sup>b</sup>, 양정현<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>경상국립대학교 기계시스템공학과, <sup>b</sup>경상국립대학교 에너지기계공학과

### Grain size measurement based on marked watershed algorithm

Beomsoo Kim<sup>a</sup>, Sangdoon Yoon<sup>a</sup>, Jaesung Kwon<sup>a</sup>, Sungwoong Choi<sup>a</sup>, Jungpil Noh<sup>b</sup>,  
Jeonghyeon Yang<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

<sup>b</sup>Department of Energy Mechanical Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, 53064, Korea

(Received 13 December, 2022 ; revised 19 December, 2022 ; accepted 21 December, 2022)

#### Abstract

Grain size of material is important factor in evaluating mechanical properties. Methods for grain size determination are described in ASTM grain size standards. However, conventional method require pre-treatment of the surface to clarify grain boundaries. In this study, the grain size from the surface image obtained from scanning electron microscope was measured using the watershed algorithm, which is a region-based method among image segmentation techniques. The shapes of the crystals are similar to each other, but the size and growth height are different. In addition, crystal grains are adjacent to each other, so it is very similar to the shape image of the topography. Therefore, grain boundaries can be efficiently detected using the Watershed algorithm.

*Keywords : Grain size; Scanning electron microscope; Watershed algorithm.*

## 1. 서 론

금속 재료의 결정립 크기는 기계적, 구조적, 화학적 성질 등 금속에 많은 영향을 미치기 때문에 결정립 크기에 대한 평가는 중요한 요소이다[1-4]. 이러한 금속의 결정립 크기 분석은 광학현미경 (Optical Microscope, OM), 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM), 투과전자현미경 (Transmission Electron Microscopy, TEM)을 이용하여 표면 관찰을 통해 측정하는 것이 일반적이다[5-9].

광학현미경을 이용한 결정립 관찰은 표면 연마

및 에칭과정을 통해 조직 관찰이 가능하나, 현미경의 분해능 한계로 인하여 미세조직 관찰에 제한이 있다[6]. 또한 투과전자현미경은 1nm 이하의 분해능으로 미세결정립의 관찰이 가능하지만, 국부적인 영역의 관찰로 조대한 결정립의 관찰에는 부적합한 단점을 가지고 있다[7,8].

주사전자현미경을 이용한 결정립 관찰은 비교적 넓은 영역의 관찰이 가능하며, 후방산란전자회절법(Electron BackScatter Diffraction, EBSD)을 이용할 때에는 결정방위를 비롯한 미세조직의 정량적 분석도 가능한 장점이 있다[8].

결정립 크기 측정 방법은 ASTM E112, E930, E11181, E1382, E2627에 조건별로 명시되어 있다[9]. 그리고 결정립 크기를 자동으로 측정 분석하여 제공하는 프로그램들의 경우, 영상처리기술

\*Corresponding Author: Jeonghyeon Yang  
Department of Mechanical System Engineering,  
Gyeongsang National University  
Tel: +82-55-772-9107; Fax : +82-55-772-9109  
E-mail: jh.yagi@gnu.ac.kr

들을 이용하고 있으며, 이러한 영상처리 방법들은 결정립과 결정입계사이의 명암(contrast)을 기반으로 경계를 구분하고 있다. 그러나 이러한 영상 이미지 관찰 결과는 금속 표면의 상태에 따라 크게 좌지우지 되는 경향이 있어, 대부분의 표면관찰에는 별도의 전처리 과정을 거치게 되어있다[9].

본 연구에서는 금속재료의 결정립을 영상처리 분석 방법 중 하나인 유역 분할(watershed segmentation) 방법을 이용하여 결정립 크기를 분석하였다. 유역 분할은 금속 이미지로부터 객체 임이 확실한 부분에 라벨링을 하고 그렇지 않은 부분을 “0”으로 라벨링함으로써 마커와 경계 영역을 지정할 수 있다[10-13]. 이러한 특징을 이용하여 금속표면에서 전자방출 정도에 따라 이미지로 표시되는 SEM으로부터 각 픽셀의 높고 낮음을 구분하여 등고선 형태의 이미지로 표시하는 것이 가능하며 유역 알고리즘을 사용하여 결정립과 경계를 구분하고자 한다.

### 2. 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 내식성 소재로 잘 알려진 STS 304를 사용하였다. STS 304의 조성은 Table 1에 나타내었다.

표면 코팅은 DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 80:20과 70:30 비율의 Cu-Ni 합금 박막을 증착하였으며, 표면 관찰에는 FE-SEM(Mira 3 LM, TESCAN)을 이용하여 관찰하였다.

### 3. 유역분할

고도차가 있는 지형에서 낮은 유역에 물을 계속 부으면 물이 차오르다가 능선을 넘어 옆 유역으로 범람하게 된다. 범람을 방지하기 위해 이 능선 위에 댐을 계속 쌓아 올리면 최종적으로 각 유역이 댐으로 분리된다. 이때 쌓아 올린 댐이 유역 간을 구분하는 경계선이 된다. 유역 분할 기법은 이 아이디어를 영상 분할에 이용한 것으로, 픽셀의 밝기를 고도로 생각하여 이미지에서 밝은 픽셀은 높은 곳으로, 어두운 픽셀은 낮은 곳에 있는 곡면으로 처리하여 영역을 분할한다. 그러나 노이즈가 많이 포함된 영상을 분할할 경우, 수 많은 극소점(local minima)로 인해 영상이 과

분할(Oversegmentation)되는 문제점이 있다 [10]. 과분할 문제를 해결하는 방법중 하나인 마커를 이용한 유역분할(marker-based watershed segmentation) 방법으로 배경과 객체 내부에 미리 정의된 또는 자동 생성한 마커를 기준으로 유역 분할을 한다[11]. 따라서 특정 영역에 지정된 초기 마커들은 영역과 일대일 관계이므로 마커 수가 최종 분할 수가 된다.

유역 분할을 효율적으로 하기 위해 이미지를 경계치(threshold)를 기준으로 이진(binary) 영상으로 변경하면 흑백(0,1)으로 나타낼 수 있다. 거리 변환(distance transform)은 특성(1) 및 비특성 픽셀(0)로 구성된 이진 디지털 이미지를 모든 특성 픽셀이 가장 가까운 비특성 픽셀까지의 거리(metric)에 해당하는 값으로 변환하는 기법이다 [12,13]. 따라서 열기(opeing)와 닫기(closing) 모폴로지 연산으로 잡음이 제거된 이미지를 거리 변환하면 객체(특성 픽셀) 영역은 주위에 분포한 비특성 픽셀(배경)과의 거리를 수치화 할 수 있으며, 분할하고자 하는 객체 영역은 피크 형태를 띠게 된다. 거리 변환된 이미지를 기준으로 마커를 지정한 후 유역 분할을 한다.

Fig. 1은 유역분할 알고리즘 순서도를 나타내었다.

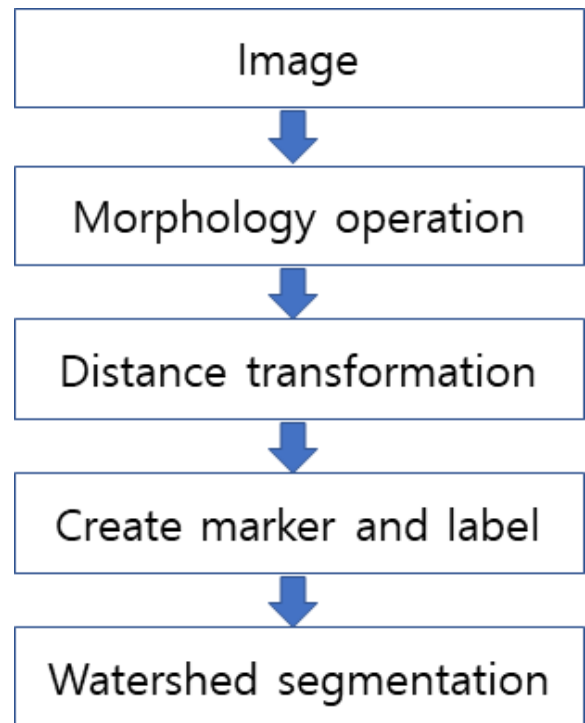


Fig. 1. The flow chart for the algorithm

Table 1. Chemical composition of STS304

							(wt. %)
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.06	1.0	2.0	0.04	0.01	8.09	18.07	Balance

1. 입력 이미지
2. “0”과 “1”로 이루어진 이진영상에 모폴로지 연산 (morphology operation)을 적용하였으며, opening(열기) 및 dilation(팽창) 연산을 이용하여 noise 보정 및 경계 추출
3. Gray image에서 subset에 대해 각 픽셀이 어느 정도 떨어져 있는지 알려주기 위해 거리 변환(distance transformation) 적용
4. 객체 확인을 위한 maker 생성과 labeling
5. Marker-based watershed segmentation

#### 4. 유역분할 결과

Fig. 2와 3은 각각 80:20, 70:30 이미지를 유역 분할을 이용하여 분할한 결과를 도시하였다. Fig. 2와 3에서 결정립의 크기를 13개로 분할하였다. No. 0 영역은 표면 이미지에서 배경영역을 나타내며, No. 1 ~ No. 12은 분할된 객체의 결정립 크기 즉, 주어진 영상 이미지의 픽셀 크기 범주에 따라 색상으로 표현한 것이다.

Fig. 2 (a)는 80:20 Cu-Ni 합금의 표면 관찰 결과를 나타내고 있으며, (b)는 morphology operation 및 distance transformation 후 얻어진 이미지를 나타내고 있다. (c)에는 maker-based watershed 결과를 나타내고 있으며, (d)에는 이렇게 얻어진 결정립을 크기에 따른 분류를 색상으로 표시한 결과 값을 나타내고 있다.

Fig. 2 (c)의 결과로부터 표면의 모든 결정립들

이 객체로써 검출되지 않은 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 원인은 3차원 입자 구성 돌기들을 영상 이미지로 표현하면 2차원이 되기 때문에 입자의 상단 단면적을 구할 때는 기둥 부분이 제외되었기 때문이다. 그리고 이미지 취득과정에서 작은 입자들은 큰 입자에 비해 상대적으로 어두운 색상을 띄게 되었으며 또한 큰 입자의 기둥 근처에 분포하고 있어 결정립으로 모두 검출되지 않는 것으로 사료된다.

Table 2는 80:20 Cu-Ni 합금 박막 이미지의 유역 분할된 영역에 대한 기하학적 통계 결과를 나타내고 있다. 평균 면적  $0.022 \mu\text{m}^2$ , Pixel 수 100 ~ 500개로 구성된 입자들이 전체 결정립 수 374개 중 150개로 40.1%의 비율로 가장 많이 분포하고 있는 것을 알 수 있으며, 면적비로는 10.56%를 차지하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 pixel 수 1,000개 이하 ( $< 0.08 \mu\text{m}^2$ )의 결정립은 전체 면적의 77.8%를 차지하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

그리고 견고성(solidity)는 입자 영역을 포함한 최외각의 convex hull 면적에 대한 입자 영역의 비율로 정의되므로[14], 견고도가 1에 가까울수록 대상 영역은 원에 가까운 형태를 나타내고 있는 것을 의미한다. Table 2에 나타낸 것과 같이, 결정립의 크기가 작을수록 견고성은 1에 가까운 값을 나타내고 있으며 원에 가까운 형태를 나타내고 있는 것으로 확인된다. 그리고 결정립의 크기가 커질수록, 즉 견고성이 1보다 작아질수록 오목한 영

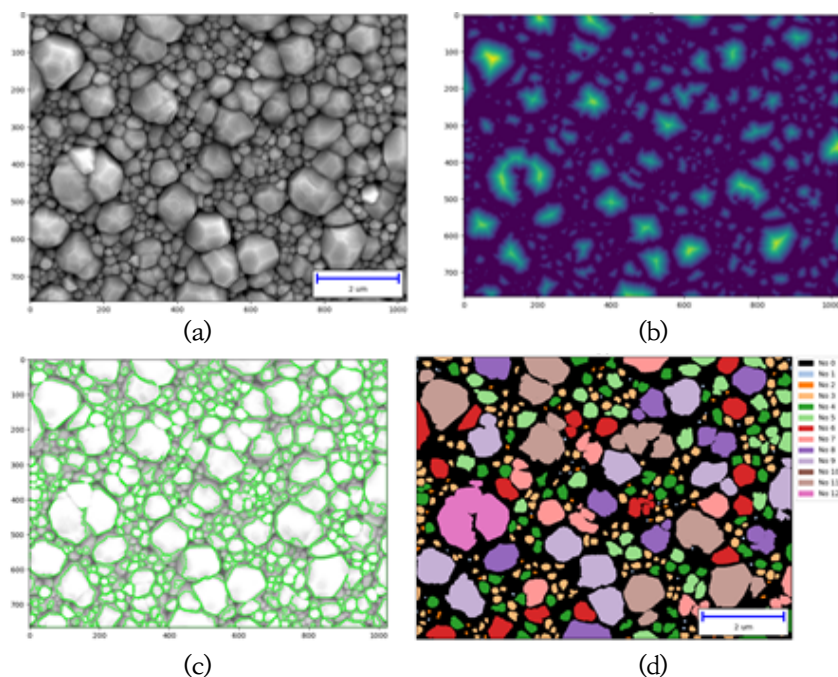


Fig. 2. 80:20 (a) original image, (b) distance transformation, (c) maker-based watershed, (d) Categorized grain

Table 2. Watershed statistics of 80:20 Cu-Ni alloy

No.	Pixel 범위	개수	평균면적( $\mu\text{m}^2$ )	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Solidity ( $\mu\text{m}$ )	Perimeter ( $\mu\text{m}$ )	Area ratio(%)
1	~50	39	0.003	0.06	0.99	0.18	0.32
2	50~100	37	0.006	0.08	0.96	0.27	0.59
3	100~500	150	0.022	0.16	0.93	0.59	9.58
4	500~1000	65	0.056	0.27	0.92	1.03	10.56
5	1000~2000	31	0.111	0.37	0.92	1.48	9.96
6	2000~3000	16	0.2	0.5	0.92	2.11	9.30
7	3000~4000	9	0.294	0.61	0.86	2.99	7.67
8	4000~6000	9	0.406	0.72	0.92	3.19	10.60
9	6000~8000	10	0.59	0.87	0.91	3.74	17.13
10	8000~10000	-	-	-	-	-	-
11	10000~20000	7	0.926	1.08	0.87	5.57	18.80
12	20000~30000	1	1.89	1.55	0.88	8.68	5.49
Total		374					

역의 비중이 증가하는 것을 의미한다.

Fig. 3과 Table 3은 70:30 Cu-Ni합금의 유역분할 결과 이미지 및 통계를 나타내고 있다. 70:30 Cu-Ni 합금에서도 평균 면적:  $0.021 \mu\text{m}^2$ , pixel 수 100 ~ 500개를 가지는 결정립이 가장 많이 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 표면 관찰

결과, 70:30 Cu-Ni 합금이 80:20 Cu-Ni 합금에 비해서 결정립의 수가 상대적으로 많이 생성된 것을 확인할 수 있었다. 또한 결정립의 크기도 80:20에 비해 작은 크기의 결정립들이 많이 생성된 것을 확인할 수 있었다.

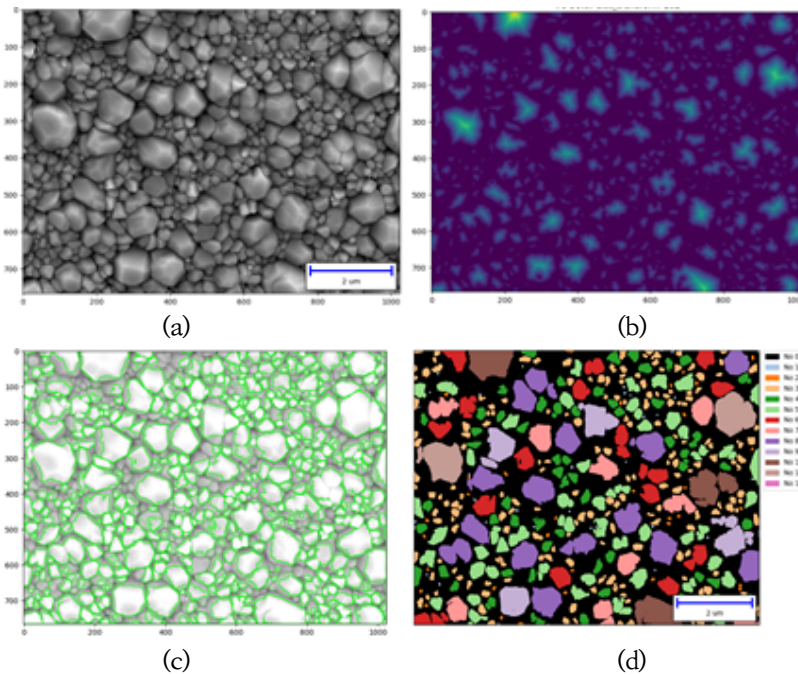


Fig. 3. 70:30 (a) original image, (b) distance transformation, (c) marker-based watershed, (d) Categorized grain

Table 2. Watershed statistics of 70:30 Cu-Ni alloy

No.	Pixel 범위	개수	평균면적( $\mu\text{m}^2$ )	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Solidity ( $\mu\text{m}$ )	Perimeter ( $\mu\text{m}$ )	Area ratio(%)
1	~50	37	0.003	0.06	0.98	0.18	0.32
2	50~100	34	0.006	0.09	0.95	0.29	0.69
3	100~500	181	0.021	0.16	0.92	0.6	12.60
4	500~1000	59	0.056	0.27	0.91	1.06	10.87
5	1000~2000	50	0.109	0.37	0.88	1.64	17.74
6	2000~3000	16	0.2	0.5	0.88	2.41	10.47
7	3000~4000	9	0.28	0.6	0.89	2.76	8.24
8	4000~6000	15	0.385	0.7	0.9	3.11	18.85
9	6000~8000	4	0.559	0.84	0.83	4.6	7.30
10	8000~10000	3	0.727	0.96	0.89	5.06	7.12
11	10000~20000	2	0.89	1.06	0.89	4.91	5.81
12	20000~30000	-	-	-	-	-	-
Total		410					

## 5. 결 론

본 연구에서는 유역 분할 알고리즘을 이용한 결정립 크기 측정 및 통계 분석을 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 유역 분할 알고리즘을 이용하여 결정립의 크기 및 분포 정도를 확인.
- 2) 견고성을 바탕으로 결정립의 형상을 가늠 가능.
- 3) 영상처리를 위한 시험편의 특별한 전처리 과정 없이 표면 이미지로부터 결정립의 크기 및 정량적인 수치로 표현.
- 4) 합금 및 결정에 따라 다양한 영상 분할 방법 제시 가능.

## REFERENCES

- [1] C. A. P. Orta, J. D. M. Santibanez, F. M. Guerrero, I. R. T. Villalobos, Method for grain size determination in carbon steels based on the ultimate opening, *Measurement*, 133 (2019) 193-207.
- [2] B. Flipon, V. Grand, B. Murgas, A. Gaillac, A. Nicolaÿy, N. Bozzolo, M. Bernacki, Grain size characterization in metallic alloys using different microscopy and post-processing techniques, *Mater. Charact.*, 174 (2021) 110977.
- [3] X. J. Wang, X. J. Sun, C. Song, H. Chen, S. Tong, W. Han, F. Pan, Grain size-dependent mechanical properties of a high-manganese austenitic steel, *Acta Metall. Sin.*, 32 (2019) 746-754.
- [4] M. Naghizadeh, H. Mirzadeh, Effects of grain size on mechanical properties and work-hardening behavior of AISI 304 austenitic stainless steel, *Steel Res. Int.*, 90 (2019) 1900153.
- [5] K. P. Mingard, B. Roebuck, E. G. Bennett, M. G. Gee, H. Nordenstrom, G. Sweetman, P. Chan, Comparison of EBSD and conventional methods of grain size measurement of hardmetals, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 27 (2009) 213-223.
- [6] S. Piazzolo, V. G. Sursaeva, D. J. Prior, Optical grain size measurements: What is being measured? comparative study of optical and EBSD grain sizes determination in 2D Al foil, *Mater. Sci. Forum*, 213 (2005) 495-497.
- [7] S. H. Kim, J. H. Kang, S. Z. Han, Grain size determination of copper film by electron backscatter diffraction, *Kor. J. Met. Mater.*, 48 (2010) 847-855.
- [8] J. H. Kang, S. H. Kim, Sample preparation for EBSD analysis: tips for metals with delicate surfaces, *Kor. J. Met. Mater.* 48 (2010) 730-740.
- [9] J. J. Friel, S. Wright, S. Sitzman, ASTM grain size by EBSD - a new standard, *Microsc. Microanal.*, 17 (2011) 838-839.
- [10] K. Parvati, B. S. Prakasa, M. Mariya, Image segmentation using gray-scale morphology and marker-controlled watershed transformation, *Discrete Dyn. Nat. Soc.*, 2008 (2008) 384346.
- [11] J. F. Rivest, S. Beucher, J. P. Delhomme, Marker-controlled segmentation: an application to electrical borehole imaging, *J. Electron. Imaging*, 1 (1992) 136-142.
- [12] G. Borgefors, Distance transformations in digital images, *Comput. Graph. Image Process.*, 34 (1986) 344-371.
- [13] R. Fabbri, L. D. F. C., Julio C. Torelli, O. M. Bruno, 2D Euclidean distance transform algorithms: A comparative survey, *ACM Comput. Surv.*, 40 (2008) 1-44.
- [14] J. Hassan, A. A. Majid, A. Jalil, Welding defect detection and classification using geometric features, 2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology, IEEE, (2012) 139-144.