

이미지 처리를 통한 공기 중 섬유의 자동계수 알고리즘 프로그램 개발

최성원 · 이희공¹ · 이종일¹ · 김현욱*

가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실 · ¹켄익 코퍼레이션

Developing Image Processing Program for Automated Counting of Airborne Fibers

Sungwon Choi · Heekong Lee¹ · Jong il Lee¹ · Hyunwook Kim*

Dept. of Prev. Med, College of Medicine, The Catholic University of Korea,

¹Kemik coporation

ABSTRACT

Objectives: An image processing program for asbestos fibers analyzing the gradient components and partial linearity was developed in order to accurately segment fibers. The objectives were to increase the accuracy of counting through the formulation of the size and shape of fibers and to guarantee robust fiber detection in noisy backgrounds.

Methods: We utilized samples mixed with sand and sepiolite, which has a similar structure to asbestos. Sample concentrations of 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%, 2%, and 3%(w/w) were prepared. The sand used was homogenized after being sieved to less than 180 μ m. Airborne samples were collected on MCE filters by utilizing a personal pump with 2 L/min flow rate for 30 minutes. We used the NIOSH 7400 method for pre-treating and counting the fibers on the filters. The results of the NIOSH 7400 method were compared with those of the image processing program.

Results: The performance of the developed algorithm, when compared with the target images acquired by PCM, showed that the detection rate was on average 88.67%. The main causes of non-detection were missing fibers with a low degree of contrast and overlapping of faint and thin fibers. Also, some duplicate countings occurred for fibers with breaks in the middle due to overlapping particles.

Conclusions: An image detection algorithm that could increase the accuracy of fiber counting was developed by considering the direction of the edge to extract images of fibers. It showed comparable results to PCM analysis and could be used to count fibers through real-time tracking by modeling a branch point to graph. This algorithm can be utilized to measure the concentrations of asbestos in real-time if a suitable optical design is developed.

Key words: Asbestos, automated counting, image processing

I. 서 론

공기 중 석면 검출 방법으로는 광학현미경인 위상차 현미경(Phase Contrast Microscopy, PCM)이나 전하현미경(Transmission Electron Microscope, TEM) 등을 이용한 계수법이 사용된다. 이 중 TEM을 이용한

분석방법은 장비가 너무 고가이고 전문적인 사용자와 많은 전처리 시간이 소요되어 정밀한 분석이 필요할 때 주로 사용한다. PCM 분석 방식은 전처리가 간단하고 고가의 장비를 필요치 않아서 널리 쓰이지만, 분석자가 직접 육안으로 섬유를 확인하고 계수하고 있어 분석자의 경험이나 숙련도에 따른 오차가

*Corresponding author: Hyunwook Kim, Tel: 02-2258-7363, E-mail: hwkim@catholic.ac.kr
Dept. of Prev. Med., College of Medicine, The Catholic University of Korea, 222 Banpo-daero, Seocho-gu, Seoul 137-701

Received: December 3, 2014, Revised: December 19, 2014, Accepted: December 27, 2014

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

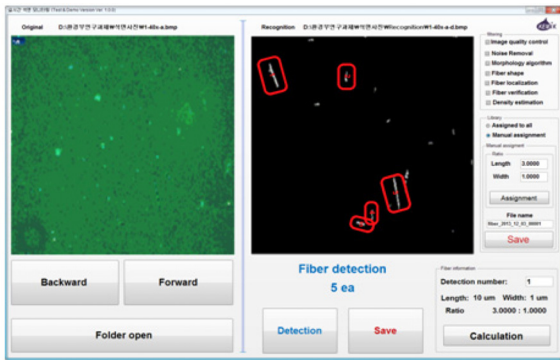


Figure 1. Image analysis program developed for fibrous matter detection

발생하고 있다(Abell et al., 1989; NIOSH, 1989). 본 연구는 PCM 분석시 오차를 줄이기 위해 영상으로 섬유 형태를 분석하는 영상처리 알고리즘 개발을 하였다. 이는 추후에 실시간으로 석면 농도를 측정하기 위한 시스템을 구축하기 위한 기반기술로 개발하였다. Figure 1은 본 연구에서 개발한 석면자동검출 영상처리 프로그램을 나타낸 것이다.

석면 영상처리는 크게 전처리, 석면 검출, 석면 궤적 추적의 세 부분으로 나눌 수 있는데, 여기서는 계수의 정확도를 좌우하는 석면 검출 부분에 초점을 맞추어서 기술한다. 석면 검출은 일반적으로 먼저 픽셀 단위에서 석면 후보 픽셀들을 이진화한 후 연결레이블링 분석을 통해 후보 픽셀들을 석면섬유 형태로 모델링한 후 비교·분석하여 계수하는 방법을 사용한다(Inoue et al., 1998). 석면 검출에서 정확도에 크게 좌우되는 모양은 크게 단일 직선 형태와 복수가지형태로 분류할 수 있다. 이러한 석면 섬유 형태는 다양성과 더불어 먼지의 노이즈로 인하여 정확히 검출하기가 쉽지 않다. 하지만 정확한 분석을 위해서는 석면의 크기와 형태를 인식할 필요가 있다.

현미경 영상 또는 영상분석을 통하여 석면 계수를 자동화하는 연구는 국내외에서 이루어졌다. 국내에서는 넓은 면적의 시료에 대하여 석면 검사를 자동화하는 연구가 이루어졌으나(Cho et al., 2011), 이는 분석 자동화 시스템에 초점이 맞추어졌으며 석면 섬유 검출에 관한 영상처리는 개선될 필요가 있다. 해외에서는 80년대에 영국 Manchester대학과 영국 안전보건청(HSE)에 의해 공동연구가 실시되었다(Kenny, 1984). 맨체스터 석면 프로그램(MAP)과 분석자간의 결과를 비교했

으나 샘플의 모든 유형에 대한 충분한 일관성이 없었기 때문에 참고자료로 사용되지 않았다. MAP를 시작으로 일본에서도 많은 연구가 이루어졌는데 Inoue et al.(1998)는 마이크로프로세서 기반의 PC를 사용하여 이미지 분석 소프트웨어를 개발하였고 Ishizu et al.(2008), Kawabata et al.(2009), Ishizu et al.(2010), 의 연구에서는 석면을 분산 염색(Dispersion staining) 처리한 후 RGB 컬러 공간에서 기계학습 기법을 이용하여 먼지와 공기방울을 석면섬유와 구분하였다. 또한 Yoshitaka et al.(2009)의 연구에서는 건축자재에 쓰이는 석면섬유를 색상 차이를 이용하여 SVM(Support Vector Machine)로 석면 후보 픽셀을 분류한 후 CRF(Conditional Random Field)로 지역적인 특성을 결합하여 석면검출의 정확도를 높였다. 그러나 이러한 방법들은 색상정보가 없는 비산 석면의 영상에는 적합하지 않으며 계산량이 많아 분석에 문제가 있다. Theodosiu et al.(2010)의 연구에서는 노이즈가 심한 비산 석면 영상에서 석면 섬유의 세그멘테이션 정확도 향상을 위해서 능동 윤곽선(Active contour) 모델을 사용하여 석면 섬유의 윤곽을 따라 분리하는 기법을 사용하였다. 이러한 방법은 정확도를 올릴 수 있으나 석면의 직선성을 활용하지 못하여 한계가 있다.

이에 본 연구는 석면의 크기 및 형태를 정식화하여 검출할 수 있는 석면 자동검출 영상프로그램을 개발하기 위한 전단계로서 비산석면의 정확한 세그멘테이션을 위해 윤곽의 그래디언트 성분을 분석하고 부분적인 선형성을 활용하였다. 이는 노이즈가 심한 환경에서도 높은 검출률을 갖게 함이며, PCM 방법과 비교하여 석면검출 정확도를 높이고, 향후 석면 분석 자동화 방법의 기반연구로 사용하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 시료포집 및 분석

본 연구에 사용된 섬유상 물질은 입자계측용 시험장치를 이용해 시료를 비산시킨 뒤 공기 포집을 하였다. 입자계측용 시험 장치란 크게 3가지 부분으로 나눌 수 있는데 1) 시료 투입구와 분사 Ejector에 해당하는 Dust Feeder(DF-3, SIBATA, Japan), 2) 분사된 시료가 맑은 공기와 혼합되는 Mixing Chamber, 3) 혼합된 시료를 포집하기 위해 각 포트에 측정기기를 연결



Figure 2. Photo of the Dust/Fiber Generation Apparatus utilized

할 수 있는 Main Chamber로 나뉜다(Figure 2). 본 연구에서는 석면과 유사한 형태를 지니고 있는 해포석을 입도 처리된 모래와 혼합하여 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%, 2%, 3%의 농도의 시료를 제작하여 포집하였다. 시료용 모래는 180 μm 이하의 입자를 체가름으로 균일화시킨 뒤 시료 제작에 이용하였다. 시료포집은 개인용 저유량 펌프(Personal pump, GilAir-3, Gilian, USA)를 이용하여 분당 2 L/min으로 30분간 포집하였다. 포집된 필터를 1/4로 절단한 후 아세톤 증기장치를 이용하여 필터를 투명화 시킨다. 필터에 트리아세틴 2-3 방울을 적하하여 슬라이드에 고정시켰다. NIOSH 7400 “A”방법에 준하여 분석자가 분석을 실시하였고, 이 영상을 사진으로 찍은 후 석면 자동검출 영상처리 프로그램을 이용하여 분석하고 결과를 비교하였다.

2. 석면 자동검출 영상처리 방법

석면 섬유는 부분적으로는 직선에 가까우며 분기점을 제외하고는 전체적으로 완만한 곡률을 지니고 있다. 이러한 형태는 튜브형 구조와 유사하여 의료 영상처리에서 쓰이는 혈관 추출 방법론을 적용할 수도 있다. 그러나 석면의 두께는 1 μm 미만의 것이 다수 존재하여 현미경 영상으로 확대하여도 폭이 넓지 않으며 서로 겹쳐지거나 붙어있는 것들도 존재한

다. 이러한 특성을 감안하여 윤곽선의 후보 픽셀들을 추출한 후 직선이나 곡선의 단편들로 피팅한 후 이를 연결하여 석면을 구성하였다.

석면 검출 알고리즘의 개요는 Figure 3과 같다. 먼저 전처리를 거친 후 픽셀 단위 연산을 통하여 석면 후보 영역을 분리한 후 석면 단편을 추출한다. 이 후 추출된 직선단편들을 연결하여 석면 섬유를 근사하여 그래프로 형식화하여 모델링한다.

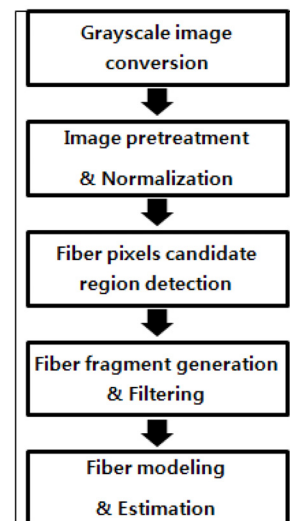


Figure 3. Flow chart of the algorithm for fibrous matter detection

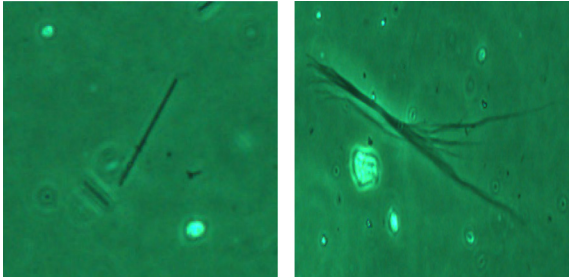


Figure 4. Images of the observed fibrous matters by PCM

이 중 검출 성능에 가장 영향이 많이 미치는 모듈은 픽셀 단위 이진화 과정으로 석면 후보 픽셀들을 추출하는 과정이다. 보통 석면 영상은 영상 잡음이나 서로 중복하여 겹치는 등의 영향으로 중간에 끊어지는 경우가 발생하는데 이는 석면의 부정확한 계수로 이어진다.

석면 섬유는 Figure 4에서 볼 수 있듯이 전체적으로 직선 형태와 복잡한 모양으로 여러 가닥이 뭉쳐져 있는 비정형 형태로 구분할 수 있다. 직선 형태의 석면은 미세하지만 검출이 상대적으로 쉽다. 반면에 비정형 형태는 완만한 곡선을 가지고 길게 이어지며 분기된 가지들이 있을 수 있어서 개체 단위의 정확한 검출이 어렵다.

비정형 형태는 직선 형태를 포함하므로 이를 대상으로 모든 형태적 변화를 반영할 수 있도록 일반적인 비산 석면의 전체 모습을 그래프 형태로 정식화한다. 이 때 석면 섬유의 부분적인 직선성을 이용하여 섬유 파편들을 모델링하면 노이즈에 강한 석면 검출이 가능할 수 있다. 개발된 알고리즘은 계산량을 줄여 실시간에 적합하면서 오검출을 줄일 수 있도록 직선 혹은 완만한 커브 검출 방법을 이용하여 석면 후보 영역을 추출한 후 이를 연결하여 확장함으로써 석면 개체의 정확한 인식을 가능하게 하였다.

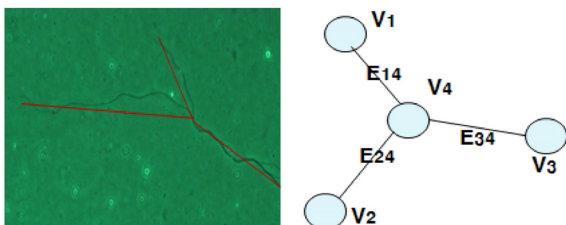


Figure 5. Modeling of an atypical fibrous matters developed for the study

1) 석면 영상 그래디언트 계산

석면 섬유의 경계에서 나타나는 밝기의 단차를 추출하여 윤곽선을 검출할 수 있다. Figure 6과 같이 영상처리에서 자주 이용되는 소벨 연산자를 적용하여 석면 윤곽선의 후보 픽셀들을 추출할 수 있다. 영상을 2D 함수로 표현할 때 소벨 마스크를 적용하여 그래디언트를 구한다. 이 때 그래디언트의 크기는 에지의 강도를 의미하며 $G(x,y) = \sqrt{G_x(x,y)^2 + G_y(x,y)^2}$ 와 같이 계산할 수 있다. 또한 에지의 방향은 $\Theta(x,y) = \arctan(G_y(x,y)/G_x(x,y))$ 로 구할 수 있다.

2) 석면 단편 검출

보편적인 윤곽선 검출 과정은 에지의 강도가 일정 크기 이상인 픽셀을 이진화한 후 이를 지역적으로 추적하면서 연결하거나 혹은 hough 변환처럼 전역적인 공간에서 직선을 추출한다(Etemadi, 1992). 그러나 가느다란 석면 섬유를 대상으로 하는 특성 상 노이즈로 인하여 대조도가 높지 않아 경계 구분이 쉽지 않다. 또한 서로 겹쳐짐으로 인하여 끊긴 구간이 존재할 수 있어서 경계를 따라서 에지를 연결하기 어렵다. 따라서 이 연구에서는 에지의 강도 뿐 아니라 주변의 영역에서 나타나는 에지의 방향 패턴을 이용하여 이진화한다.

석면 섬유는 부분적인 직선으로 근사할 수 있는데 에지 방향의 유사성을 이용하여 주변부를 하나로 묶는 방법을 이용한다(Burn et al., 1986). 즉, Figure. 7

-1	0	+1
-2	0	+2
-1	0	+1

Gx

+1	+2	+1
0	0	0
-1	-2	-1

Gy

Figure 6. A mask figure of the Sobel operator for gradient calculation

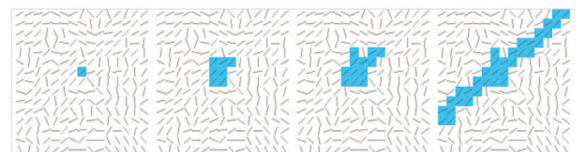


Figure 7. Illustration showing the growth of a linear formation

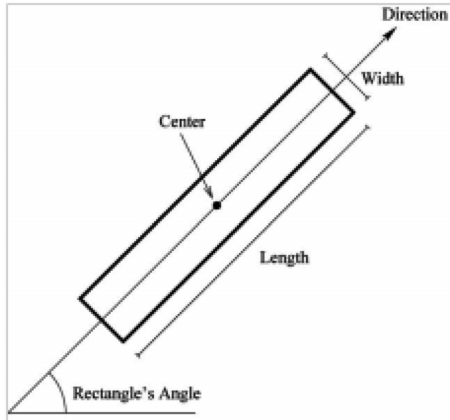


Figure 8. Linear fragment outline with a center point, rectangle's angle, length and width

과 같이 일정 크기의 이상의 에지 크기를 가진 후보 픽셀에서 출발하여 그래디언트 벡터의 방향성이 유사한 영역으로 확장하여 윤곽선의 일부가 될 수 있는 선형 단편들로 키울 수 있다. 이러한 영역을 선형 지지 영역(Line support region)으로 정의한다.

선형 지지 영역은 Figure 8과 같이 직사각형으로 모델링할 수 있다(Grompone et al., 2010). 선형 단편의 무게중심 cx , cy 는 그래디언트의 크기를 고려하여 아래 식과 같이 계산한다.

$$cx = \frac{\sum_{j \in \text{Region}} G(j)x(j)}{\sum_{j \in \text{Region}} G(j)}$$

$$cy = \frac{\sum_{j \in \text{Region}} G(j)y(j)}{\sum_{j \in \text{Region}} G(j)}$$

또한, 선형 단편의 방향성은 고유치 벡터로 표현할 수 있다.

$$m^{xx} = \frac{\sum_{j \in \text{Region}} G(j)(x(j) - cx)^2}{\sum_{j \in \text{Region}} G(j)}$$

$$m^{yy} = \frac{\sum_{j \in \text{Region}} G(j)(y(j) - cy)^2}{\sum_{j \in \text{Region}} G(j)}$$

$$m^{xy} = \frac{\sum_{j \in \text{Region}} G(j)(x(j) - cx)(y(j) - cy)}{\sum_{j \in \text{Region}} G(j)}$$

선형 지지영역은 greedy 방식으로 에지강도가 큰 후보픽셀부터 시작하여 직사각형으로 근사한다. 원

거리에 위치한 가느다란 석면은 하나의 윤곽으로 수렴할 수 있으나 근거리에서 위치한 큰 석면은 너비를 가질 수 있다. 따라서 직사각형으로 근사한 석면 단편의 인접한 영역에서 유사한 방향의 단편 윤곽을 검색하여 평행한 한 쌍의 직사각형 분포를 합쳐서 통합한다.

3) 석면 가닥 곡선 근사

석면의 형태는 바늘 모양의 짧은 직선형 뿐 아니라 곡선형이 존재하며 가지 형태로 분기하는 것들도 존재한다. 이러한 곡선을 근사하고 하나의 가닥으로 생성하기 위해서는 직선으로 근사한 석면 단편들을 연결하여야 한다.

직선 단편의 양 끝점 주위를 탐색하여 연결이 가능한 단편이 존재하는지 확인한다. Figure 9와 같이 직선 단편 간의 방향성 차이가 일정 범위를 벗어나는지 테스트한다. 이렇게 성장시킨 전체 석면 곡선의 곡률을 계산하여 지나치게 휘어진 석면 곡선은 제거한다.

4) 석면 그래프 생성

연결된 석면 가닥들은 가지 형태로 분기하여 서로 결합될 수 있다. 석면 가닥들의 끝점 주변에서 방향성이 다른 가닥과 결합하여 하나의 석면으로 계수하여야 한다.

석면 섬유는 그림 5와 같이 그래프로 모델링할 수 있다. 그래프의 노드 V_i 는 석면 단편에 해당하며 길이 및 두께, 평균 곡률 등을 속성으로 가진다. 그래프의 에지 E_{ij} 는 섬유 단편 간의 관계를 결합 위치, 결합 방향성, 결합 유형 등으로 표현한다.

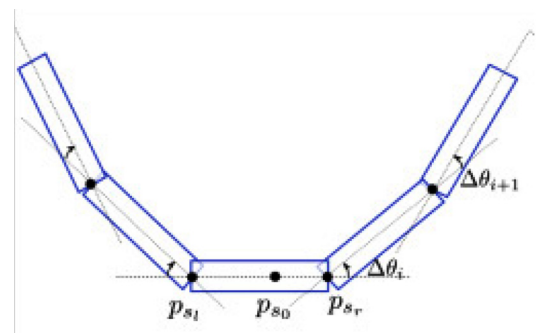


Figure 9. Curving approximation of a fibrous matter through the connection of linear fragments

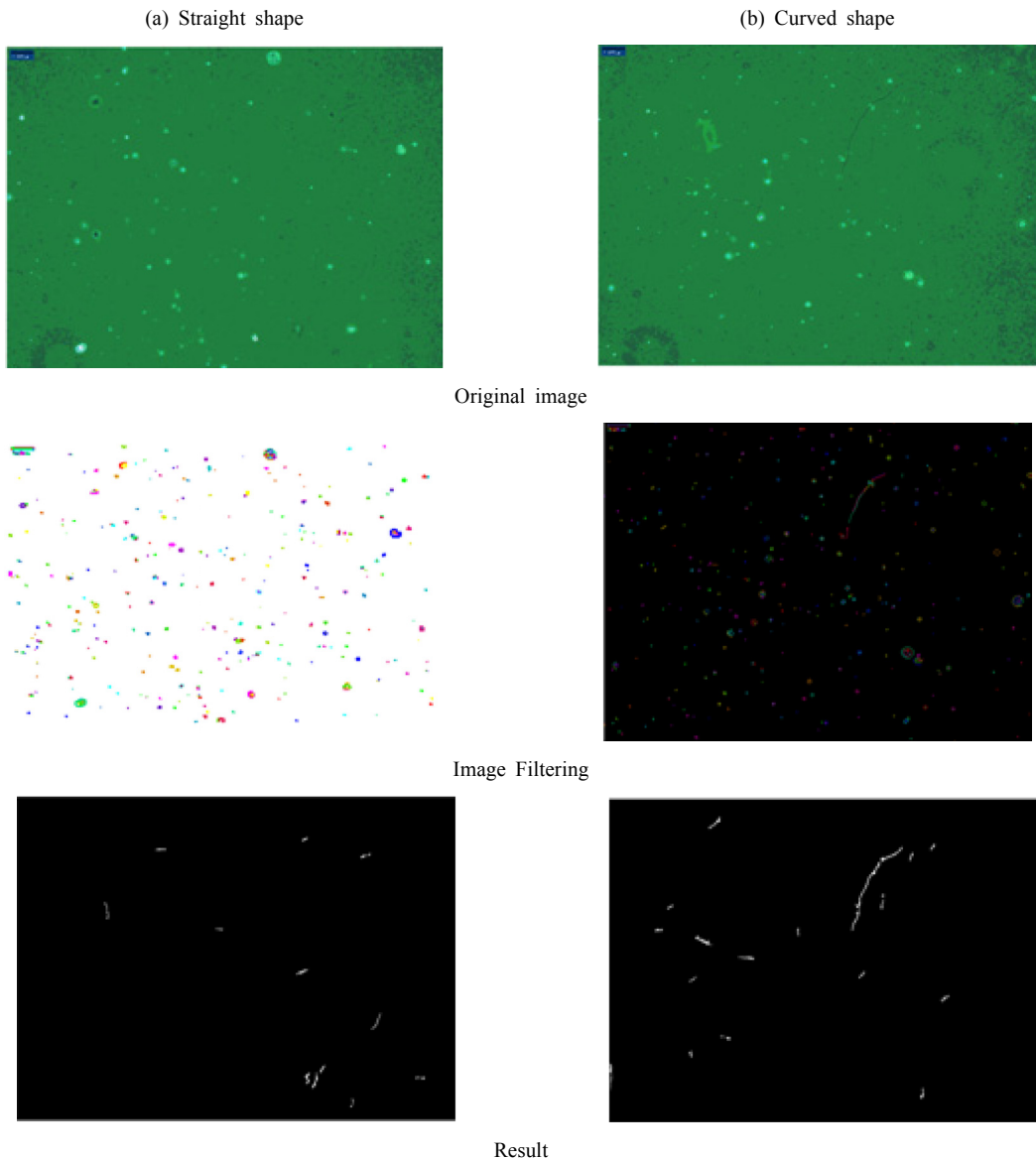


Figure 10. Steps showing fiber detection results for straight & curved fibers (400×) after image filtering

III. 결과 및 고찰

이에 본 연구에서는 PCM으로 획득한 영상을 대상으로 석면검출 알고리즘의 성능을 평가했다. 석면의 관 모양에 따라 바늘 형태의 섬유와 복잡한 커브 형태를 지닌 섬유에 대하여 평가할 필요가 있다. 그림 4는 PCM 석면 영상에 대하여 바늘형과 커브형에 대한 검출 결과를 나타내고 있다.

개발된 석면 검출 알고리즘은 계수의 정확도를 높이기 위해서 석면의 흐릿한 영상을 추출할 수 있도록 에지의 방향성을 고려하였다. 또 복잡한 형태의 석면을 표현하기 위하여 윤곽선을 추적하여 분기점을 그래프 형태로 모델링함으로써 실시간 추적이 가능하게 하였다. 이를 바탕으로 실시한 실험 결과는 다음과 같다. 해포석(Spiolite)의 함유율에 따른 PCM 방법과 개발한 Image program 방법의 상관성을 비교

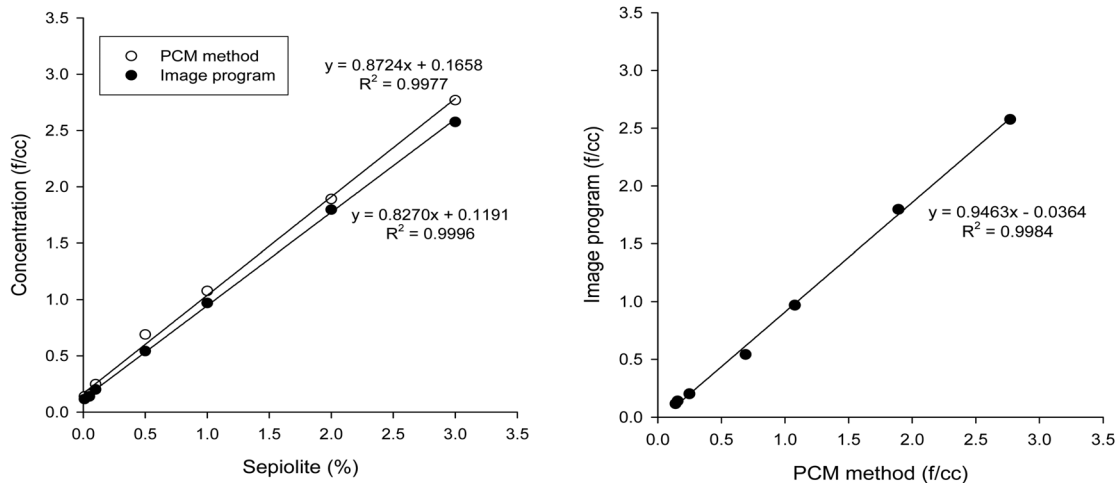


Figure 11. Correlation of the PCM method and image program method according to the sepiolite content

Table 1. Comparison of fiber concentration measured by PCM and the image program

Content	PCM	Image program	(f/cc) PCM-Image /PCM *100
0.01%	0.1396	0.1163	16.7
0.05%	0.1551	0.1396	10.0
0.1%	0.2481	0.2016	18.7
0.5%	0.6901	0.5428	21.3
1%	1.0769	0.9692	10.0
2%	1.8912	1.7967	5.0
3%	2.7693	2.5754	7.0

해본 결과 $R^2=0.997$ 과 $R^2=0.999$ 로 아주 높은 상관관계를 보였다. PCM법과 Image program법 또한 $R^2=0.998$ 으로 높은 상관성을 보였다(Figure 11). 하지만 총 541개 영상에서 459개의 섬유상 물질이 PCM으로 관찰되었고 Image program으로는 407개의 섬유상 물질이 관찰되었다. Image program은 52개의 미검출을 나타내었고 88.7%(81.3%-95.0%)의 정확도를 보였다(Table 1). 다른 연구 결과에서는 분산염색을 이용하여 개발된 석면 검출 프로그램을 사용하여 평균 0.21-0.37의 오검출을 보였다. 비슷한 결과를 보였지만 aspect ratio가 크면 클수록 오검출이 높아졌고 aspect ratio가 작을수록 과검출이 되는 단점이 있었다(Kawabata et al., 2009). 또한 Segmentation을 이용한 이미지 검출 프로그램을 사

용하여 0.806의 F-measure수치를 보인 연구결과도 있었다(Theodsiou et al., 2010). 이 수치는 본 연구와 비슷한 결과이다. Cho et al.(2011)의 연구에서는 high-throughput microscopy(HTM)장비를 개발하여 현장시료를 평가하였다. 평가결과 0.909-155%의 정확도를 보였다. 현장시료이기 때문에 종류에 따라 정확도가 크게 차이나는 것을 볼 수 있었다. 본 연구는 일정한 공간 내의 실험실에서 이루어진 결과이므로 향후에는 현장시료를 이용하여 오차에 영향을 주는 다양한 요인을 분석하여야 정확한 평가가 이루어질 수 있을 것으로 보인다.

개발된 석면프로그램의 미검출은 52개로 주요 원인으로는 주변 대조도가 낮은 희미한 가느다란 석면과 겹쳐짐으로 인하여 누락되는 경우가 발생하였고 PCM 분석 시 심도(Depth)에 따라 보이는 섬유와 보이지 않는 섬유가 존재한다. 개발한 프로그램의 경우는 field내에서 가장 많은 섬유를 획득할 수 있는 심도를 정하여 계수하였기 때문에 간혹 섬유가 누락되는 경우도 있었다. 또한 중간에 다른 먼지 입자로 인하여 끊김이 있는 경우에 중복 계수되는 경우가 일부 있었다. 교차섬유 및 섬유다발의 형태를 가진 섬유상 물질을 단일섬유로 파악, 더 적게 계수하여 오검출의 원인이 되었다. 향후 오검출을 줄이기 위해서는 에지추출 후 패턴 연계성을 확인하는 알고리즘 처리과정을 거쳐 서로 이어주거나 확인(Verification)과정을 통하여 필터링하여 개선하려 한다(Table 2).

Table 2. The number of detection failures by the image program (fiber)

Content	Fields counted	fibers by PCM	fibers by Image program	# of detection failures
0.01%	100	18	15	3
0.05%	100	20	18	2
0.1%	100	32	26	6
0.5%	100	89	70	19
1%	72	100	90	10
2%	41	100	95	5
3%	28	100	93	7
SUM	541	459	407	52

또한 추가적인 검출 알고리즘 보완으로 최대 검출가능성을 확인해야 한다. 이러한 개선된 알고리즘을 바탕으로 한다면 실시간 동영상에 대하여도 비산 석면 먼지의 농도를 측정할 수 있을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구를 통해 개발한 이미지 프로그램과 분석자 간의 결과를 비교한 결과가 88.7%의 정확도를 나타내었고, 이는 기존 연구결과와 비교해도 한층 개선된 결과를 보였다. 개발된 프로그램을 바탕으로 향후에는 실시간 비산 섬유의 농도를 측정할 수 있다고 사료된다.

실시간 측정을 위해서 보완되어야 할 점은 거리에 따른 스케일 변화 고려와 여러 가변인자들의 문턱치 (Threshold)를 자동화함으로써 일관된 성능을 유지해야 하는 점이다. 본 연구는 실시간 동영상 분석을 위한 선행개발이므로 분석에 적합한 광학 설계가 이루어질 경우 이에 따른 추가 연구 및 개발이 진행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 환경부의 생활공감 환경보건 기술개발사업에서 지원받아 수행되었습니다.

References

Abell M, Shulman S. A, Baron P. A. The Quality of Fiber Count Data App. Ind. Hyg. 1989;4:283-285

Baron, P.A. Measurement of airborne Fibers: A review. Ind. Health 2001;39:39-50.

Burns JB, Hanson AR, Riseman EM. Extracting Straight Lines. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986;8(4):425-455.

Cho MC, Yoon S, Han H, Kim JK. Automated Counting of Airborne Asbestos Fibers by a High-Throughput Microscopy (HTM) Method, Sensors. 2011;11:7231-7242

Etemadi A. Robust segmentation of edge data. Int. Conf. on Image Processing and its Applications. 1992: 311-314

Grompone von Gioi R, Jakubowicz J, Morel JM, Randall G. LSD: A fast line segment detector with a false detection control. 2010;32:722-732

Inoue Y, Kaga A, Yamaguchi K, Kamoi S. Development of an automatic system for counting asbestos fibers using image processing. Part. Sci. Technol. 1998;16: 263-279.

Ishizu K, Takemura H, Kawabata K, Asama H, Mishima T, Mizoguchi H. Image Processing of Particle Detection for Asbestos Qualitative Analysis Support Method - Particle Counting System Based on Classification of Background Area. Proceedings of International Conference on Control Automation Robotics and Vision. 2008;868-873

Ishizu K, Takemura H, Kawabata K, Asama H, Mishima T, Mizoguchi H. Automatic Counting Robot Development Supporting Qualitative Asbestos Analysis - Asbestos, Air Bubbles, and Particles Classification Using Machine Learning -. Journal of Robotics and Mechatronics. 2010;22(4):506-513

Kawabata K, Komori Y, Mishima T, Asama H. An asbestos fiber detection technique utilizing image processing based on dispersion color. Part. Sci. Technol. 2009;27:177-192.

Kenny LC. Asbestos fibre counting by image analysis-the performance of the Manchester asbestos program on Magiscan. Ann Occup Hyg. 1984;28:401-415

NIOSH : Manual of Analytical Methods, 3rd ed., Washington D.C., DHHS(NIOSH) Pub. 1989; 84-100

Theodosiu Z, Tsapatsoulis N, Bujak-Pietrek S, Szadkowska-Stanczyk. Airborne asbestos fibers detection in microscope images using re-initialization free active contours. Conf. Proc. IEEE Eng Med Biol. Soc. 2010:4785-4788

Yoshitaka M, Kazuhiro H, Haruhisa T. Asbestos Detection from Microscope Images Using Support Vector Random Field of Local Color Features, Advances in Neuro-Information Processing, Springer Berlin. 2009; 5507:344-352.