

이미지 프로세싱 기법을 이용한 섬유복합재료의 정량적인 섬유분산성 평가

Quantitative Evaluation of Fiber Dispersion of the Fiber-Reinforced Cement Composites Using an Image Processing Technique

김윤용*, 이방연**, 김정수**, 김진근**†

Yun Yong Kim*, Bang Yeon Lee**, Jeong-Su Kim** and Jin-Keun Kim**†

초 록 섬유복합재료의 역학적인 관점에서 볼 때 PVA-ECC (polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite)의 섬유분산성 평가는 매우 중요한 요소이다. 그러나 PVA 섬유의 낮은 명암비 때문에 시멘트계 재료와 섬유를 구별하기가 어려우므로, PVA-ECC의 섬유분산성 평가를 하기에는 어려운 점이 있다. 이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 PVA-ECC 내의 섬유분산성을 평가할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 형광의 원리를 이용하여 섬유복합재료 단면에서 PVA 섬유가 초록빛을 발하는 이미지를 얻었고, PVA-ECC 시편에 대한 섬유분산성은 형광 현미경에 부착된 CCD (charge coupled device) 카메라를 통하여 얻어진 이미지를 이미지 프로세싱 기법과 통계적인 방법을 이용하여 평가하였다. 또한 형상분석을 통하여 섬유의 방향성이 분산성에 미치는 영향을 파악하였으며, 판별함수기법과 분수령 알고리즘을 이용하여 섬유 검출 성능을 향상시킬 수 있는 기법을 제시하였다.

주요용어: 섬유복합재료, 섬유분산성, 이미지 프로세싱, 분수령 알고리즘

Abstract The fiber dispersion in fiber-reinforced cementitious composites is a crucial factor with respect to achieving desired mechanical performance. However, evaluation of the fiber dispersion in the composite PVA-ECC (polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite) is extremely challenging because of the low contrast of PVA fibers with the cement-based matrix. In the present work, a new evaluation method is developed and demonstrated. Using a fluorescence technique on the PVA-ECC, PVA fibers are observed as green dots in the cross-section of the composite. After capturing the fluorescence image with a charged couple device (CCD) camera through a microscope, the fiber dispersion is evaluated using an image processing technique and statistical tools. In this image processing technique, the fibers are more accurately detected by employing an enhanced algorithm developed based on a discriminant method and watershed segmentation. The influence of fiber orientation on the fiber dispersion evaluation was also investigated via shape analyses of fiber images.

Keywords: Fiber-Reinforced Cement Composite, Fiber Dispersion, Image Processing, Watershed Algorithm

1. 서 론

최근 들어 높은 연성을 갖는 고인성 섬유복합재

료에 대한 관심이 건설 분야에서 크게 증가하고 있으며, 특히 ECC(engineered cementitious composite)로 알려진 고인성 섬유복합재료가 국내에 소개되면

(접수일: 2007. 2. 22, 심사완료일: 2007. 3. 20) * 충남대학교 토목공학과, ** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, † Corresponding author: Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701 (Email: kimjinkeun@kaist.ac.kr)

서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. ECC는 모르타르에 2% 이내의 합성섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 수축, 수백 배에 달하는 인장변형을 경화거동을 보이는 고인성 섬유복합재료[3]로서 포틀랜드 시멘트(Portland cement)를 주 결합재로 사용하는 콘크리트/모르타르와 유사한 배합의 매트릭스를 사용한다. 이 재료에 적용되는 합성섬유는 짧은 길이로 재단된 단섬유(chopped fibers) 형태의 유기섬유로써 매트릭스 내부에서 무작위로 분포되어 있다. 특히 이 연구에서는 고성능 PVA (polyvinyl alcohol) 섬유를 사용한 PVA-ECC를 섬유분산성(섬유가 매트릭스 내에서 고루 분산되어 있는 정도) 평가의 대상으로 하고 있다. PVA-ECC의 우수한 인장 성능은 PVA 섬유가 매트릭스의 균열 면에서 가교작용을 함으로써 발현된다. 따라서 섬유의 분산성이 복합재료의 성능에 결정적인 영향을 미치게 된다. 그러나 섬유복합재료의 섬유분산성을 평가하는 방법은 현재 X-ray를 이용하여 섬유분산성을 평가하는 수준에 머무르고 있으며, PVA 섬유와 같은 유기합성섬유의 분산성평가기술 또는 연구가 크게 미흡한 실정이다[4].

PVA-ECC의 섬유분산성을 평가하기 위해서는 먼저 복합재료 내의 섬유를 검출하여야 한다. 그러나 시멘트계 매트릭스의 낮은 명암비 때문에 X-ray와 광학현미경을 이용하여 매트릭스와 섬유를 구별하기는 쉽지 않다. 이 문제점을 해결하기 위하여 이 연구에서는 형광 원리를 적용하였다. 임의의 물체에 형광을 비추면 특정한 색의 빛을 다시 반사하는 것을 형광 원리라고 하며, 이 원리를 이용하면 낮은 명암비를 갖는 재료에서도 높은 분해능을 얻을 수 있기 때문에 생물의학 분야와 GFP(green fluorescent protein) 필터를 사용하는 분자생물학 분야에서 이 기법이 널리 활용되고 있다[5].

Torigoe 등[6]은 형광 현미경(fluorescence microscope)을 이용하여 얻은 디지털 이미지를 이진화한 후 전체 이미지를 일정한 크기의 블록으로 나누고 각 블록에 있는 섬유의 개수를 수작업에 의해 파악한 후 이 자료를 바탕으로 섬유분산성을 파악하였다. 그러나 이 방법은 블록의 크기에 따라 섬유분산성을 나타내는 계수가 달라지는 단점이 있다.

따라서 이 연구에서는 형광 현미경과 GFP 필터를 사용하여 PVA-ECC 내의 PVA 섬유와 매트릭스를 구별하였고, 여기서 PVA 섬유만 초록빛을 발하는 것을 관찰하였다. PVA-ECC 시편에 대한 섬

유분산성은 형광 현미경에 부착된 CCD 카메라를 통하여 얻어진 이미지를 이미지 프로세싱 기법과 통계적인 방법을 이용하여 평가하였다. 또한 섬유의 방향성이 분산성에 미치는 영향을 파악하였으며, 판별함수기법과 분수령 알고리즘(watershed algorithm)[7]을 이용하여 섬유의 검출 성능을 향상시킬 수 있는 기법을 제시하였다.

2. 섬유분산성 평가

2.1. 실험체 제작 및 촬영 장치

마이크로역학 기법[1]을 적용하여 우수한 성능을 갖도록 설계된 PVA-ECC 실험체를 3개 제작하였다. 이 실험체는 28일 동안 수중양생을 실시하였으며, 양생된 실험체의 2 단면을 다이아몬드 커터를 이용하여 두께 13 mm, 폭 36 mm, 높이 20 mm로 재단하여 Fig. 1과 같이 섬유분산성 평가를 위한 시편을 제작하였다. 형광 현미경으로부터 선명한 이미지를 얻기 위하여 제작된 시편의 표면을 그라인더로 연마한 후에, 형광 현미경(Olympus, BX51)을 통하여 시편을 관찰하였다. Fig. 2는 섬유분산성 측정에 사용된 형광 현미경이며, 형광 현미경을 이용하여 섬유복합재료내의 섬유를 검출하는 과정은 다음과 같다. 수은 조명에서 GFP 필터를 통해 형광된 빛을 시편에 조사시키면, 시편의 섬유가 특정한 빛을 발광하게 된다. 이 발광된 빛이 다시 GFP 필터를 통과하게 되면서 PVA 섬유의 특정 발광 빛만을 필터링하게 된다. 그리고 이 발광된 빛은 현미경을 통해 확대되고, 현미경에서 확대(4배율)된 이미지는 CCD 카메라에 의해 촬영된다. Fig. 3은 형광 현미경에 의하여 계측된 PVA-ECC의 단면 이

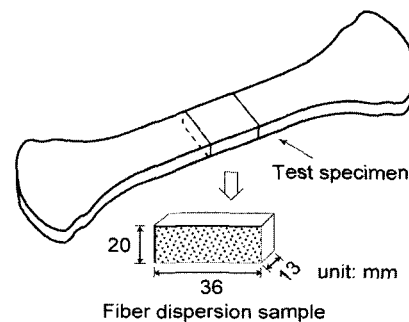


Fig. 1 Sample for the evaluation of fiber dispersion

미지이다. 여기서 확인할 수 있듯이 촬영된 이미지에는 PVA 섬유만 초록빛을 나타내고 있다.

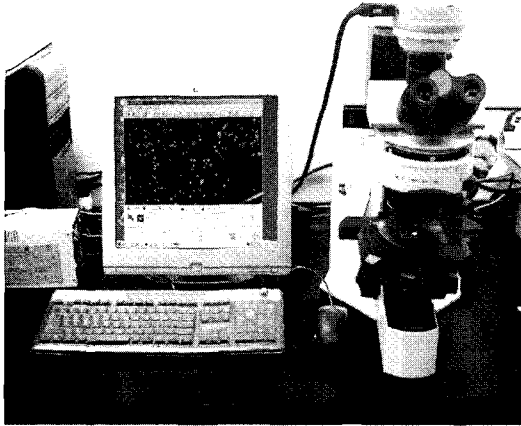


Fig. 2 Fluorescence microscope employed for obtaining fluorescence image (Olympus, BX51)

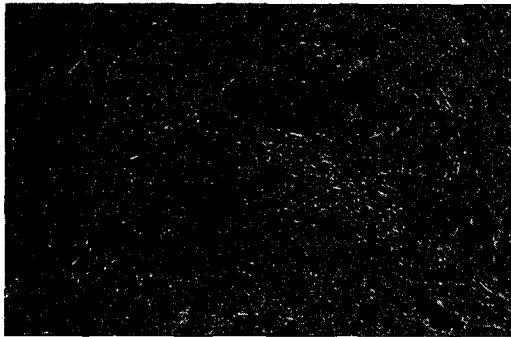


Fig. 3 Cross-sectional fluorescence image

2.2. 섬유분산성 평가 기법

2.2.1. 개요

형광 현미경으로 촬영한 PVA-ECC 단면 이미지는 2.1절에서 기술한 바와 같이 PVA 섬유만 초록색으로 나타나기 때문에 PVA 섬유와 배경만 분리하면 섬유의 분산 정도를 정량적으로 파악할 수 있다. 먼저 섬유의 분산 정도는 식 (1)과 같은 분산계수를 통해 정량적으로 나타낼 수 있다[8].

$$\alpha_f = \exp \left[- \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - 1)^2}{n}} \right] \quad (1)$$

여기서 x_i 는 섬유가 균일하게 분포하였을 때 하나의 섬유가 차지하게 되는 i 번째 영역 안에 있는 섬유의 개수이며, n 은 섬유의 총 개수이다. 이 분산계수는 섬유가 이상적인 균일 분포를 하였을 때 1의 값을 갖게 되며 섬유가 비균일 분포를 할수록 0에 가까운 값을 갖게 된다. 이를 자동화하기 위한 이미지 프로세싱 절차는 다음과 같다.

- 1) 칼라 이미지(RGB image)를 회색 이미지(grayscale image)로 변환
- 2) 회색 이미지를 이진 이미지(binary image)로 변환
- 3) 전체 이미지를 섬유의 총 개수에 해당하는 n 개의 정사각형 영역으로 분할
- 4) 각 영역 안에 있는 섬유 개수(x_i) 파악

위의 절차에 따라 섬유의 분산성을 파악할 때, 섬유의 방향성이 섬유분산성에 미치는 영향과 섬유가 정확히 검출되는지 여부에 대한 검토가 필요하다. 즉, Fig. 4는 회색 이미지와 위의 절차에 따라 섬유로 검출된 영역의 최외곽 화소만으로 구성된 이미지를 합성한 이미지로서 A, B, C 섬유는 촬영하는 방향과 다양한 각도를 이루는 섬유를 나타내고 있는데, 이러한 섬유의 방향성이 위의 절차에 따라 섬유의 분산성을 파악할 때 어떠한 영향을 미치는지 파악하여야 한다. 또한 B와 D 섬유는 실제로 인접한 두 개의 섬유인데 하나의 섬유로 검출된 경우이다. 따라서 보다 정확히 섬유분산성을 파악하기 위하여 2)와 3)의 과정 사이에 추가적인 검출 알고리즘이 필요하다.

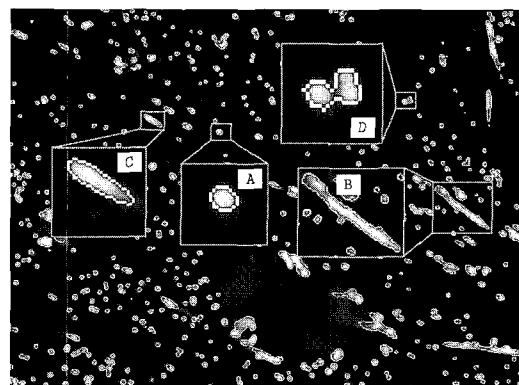


Fig. 4 Composite image obtained by combining original grayscale image with detected binary image (the white line surrounding gray particles)

2.2.2. 섬유 방향성에 따른 섬유분산성 계수(α_f)의 영향

섬유의 방향성이 섬유분산성 계수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 총 3개의 시편에 대하여 섬유의 방향성을 파악할 수 있는 형상분석을 통하여 섬유분산성 계수를 구하였다. 즉, 물체의 형상을 나타내는 형상계수의 기준을 바꾸어 가면서 형상계수의 기준보다 큰 섬유만을 추출하여 섬유분산성 계수를 구하였다. 이 논문에서는 다양한 형상계수 중에서 packing density를 이용하였다. Packing density의 정확한 의미는 물체의 면적을 물체의 외접원에 해당하는 면적으로 나눈 값이다[9]. 이를 수식으로 나타내면 다음 식 (2)과 같다.

$$F_c = \frac{A_{ob}}{A_{cc}} \quad (2)$$

여기서 A_{ob} 는 물체의 면적이고, A_{cc} 는 물체의 외접원에 해당하는 면적이다. Fig. 5(a)와 같이 촬영 방향과 수직에 가까운 섬유의 F_c 는 0에 가까운 값을 나타내고, Fig. 5(b)와 같이 촬영 방향과 평행한 방향의 섬유의 F_c 는 1에 가까운 값을 나타낸다.

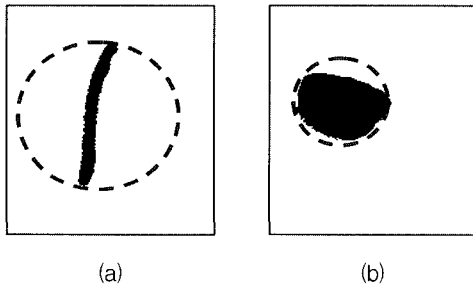


Fig. 5 Two types of objects surrounded by a circumscribed circle for (a) relatively low packing density and (b) relatively high packing density

2.2.3. 검출 성능 향상을 위한 알고리즘

2.2.1절에서 기술한 이미지 프로세싱 절차만을 적용하였을 때 발생하는 검출 성능의 부정확성을 개선하고자 추가적인 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 2.2.1절에 기술한 이미지 프로세싱 알고리즘 절차에서 2)와 3) 프로세스 사이에 수행된다. 검출 성능 향상을 위하여 제안한 알고리즘은 크게 2부분으로 나뉘게 되며 다음과 같다.

1) 이진화에 의해 검출된 섬유들의 분류

다양한 이진화 기법들 중에서 Otsu가 제안한 판별함수기법[10]을 사용하여 검출된 섬유의 유형을 분류하였다. 이 기법은 현재 널리 사용되고 있는 이진화 기법의 하나로서 비교적 안정적인 결과를 제공하는 것으로 알려져 있다[11]. 판별함수기법에 의하여 분류된 검출된 섬유 이미지의 전형적인 형상은 Fig. 6에 나타난 바와 같으며, 이 연구에서는 총 4가지 유형으로 분류하였다. 유형 1은 섬유의 방향이 촬영 방향과 평행하여 절단면에서 보이는 검출된 섬유 이미지의 형상이 원에 가까운 섬유이다. 이 유형의 섬유는 Fig. 7(a)와 같이 전체 섬유의 packing density에 대한 히스토그램에서 판별함수기법 원리에 따라 결정된 기준보다 큰 값을 갖는 섬유이다. 유형 2는 유형 1을 제외한 섬유들만 갖고 재구성한 히스토그램에서 판별함수기법 원리에 따라 다시 구한 기준보다 큰 값에 해당되는 유형이다(Fig. 7(b)). 이 유형의 섬유는 주로 일직선 형태가 아닌 군집된 인접 섬유들이 하나의 섬유로 잘못 검출된 경우이다. 유형 3과 4는 길이와 폭의 비율이 큰 섬유 이미지들로서 주로 섬유의 방향이 촬영 방향과 수직에 가깝거나, 일직선으로 군집을 이룬 섬유군이 하나의 섬유로 잘못 검출된 경우이다. 따라서 packing density만으로는 이들의 유형을 분류하기 어렵기 때문에 유형 3과 4는 식 (3)으로 표현되는 단위 면적당 최외각 둘레 값을 이용하여 판별하도록 알고리즘을 구성하였다. Fig. 7(c)는 유형 1과 2를 제외한 섬유들의 단위면적당 최외각 둘레의 히스토그램을 나타낸다. 여기서도 두 유형을 나누는 기준으로 판별함수기법 원리를 적용하였다.

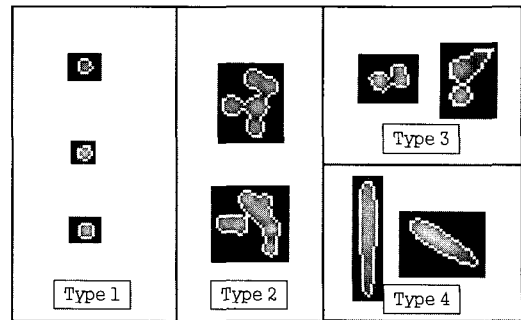
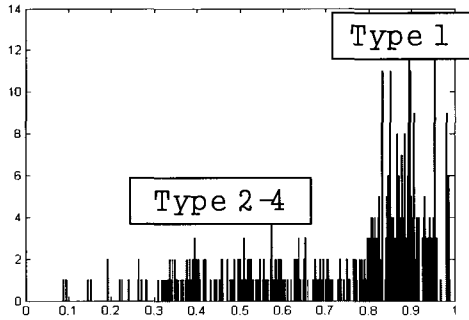


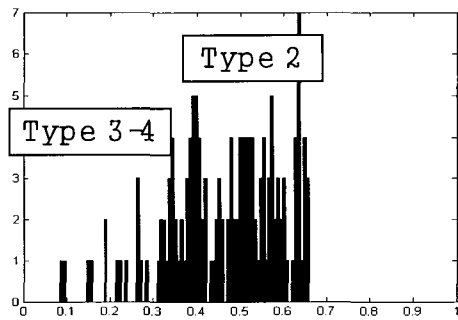
Fig. 6 Classification of fiber images based on shape characteristics

$$F_p = \frac{l_{po}}{A_{ob}} \quad (3)$$

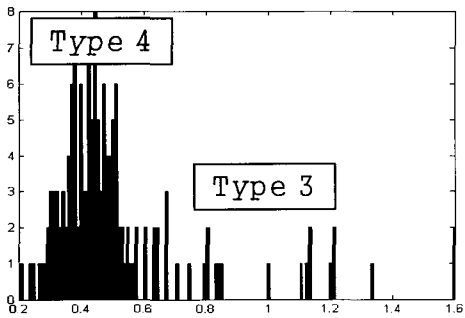
여기서 l_{po} 는 물체의 최외곽 둘레이고, A_{ob} 는 물체의 면적이다.



(a) Histogram of packing density for all the fiber images



(b) Histogram of packing density plotted with type 2, 3 and 4



(c) Histogram of perimeter per unit area for classifying type 3 and 4

Fig. 7 Typical histograms plotted for determining three threshold values to classify fiber images into four shape types

2) 분수령 알고리즘을 이용한 유형 2와 3에서 각 섬유들의 검출

분수령 알고리즘은 Beucher 등[7]에 의해 처음 소개되었으며 Fig. 8과 같이 2개 이상의 peak를 가진 이미지에서 물체들을 분할하는데 널리 사용되어 왔다[12]. Fig. 9는 분수령 알고리즘을 이용하여 두

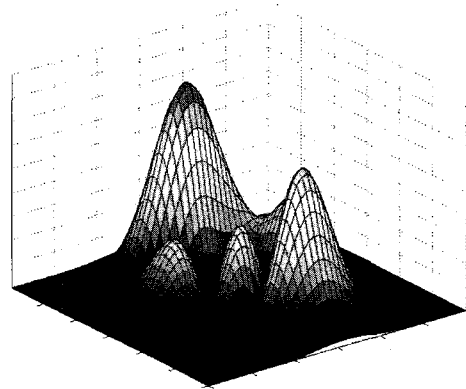
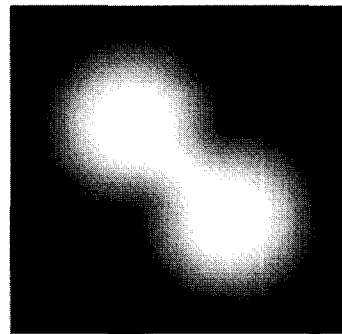
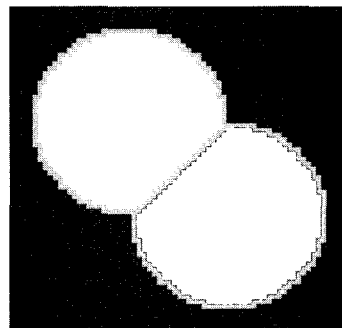


Fig. 8 Image with more than two peaks, where the vertical axis indicates brightness



(a) Original image



(b) Segmented image

Fig. 9 Watershed segmentation for (a) original image and (b) resulting segmented image

개의 peak를 가진 이미지를 배경과 각 peak에 해당하는 부분으로 분리한 예를 보이고 있다. 앞에서 기술한 바와 같이 하나의 섬유로 인식되었지만 실제로 여러 개의 섬유로 구성되는 유형 2와 3의 섬유들에 대하여 분수령 알고리즘이 적용된다. 분수령 알고리즘에 의해 각각 분리된 섬유들은 유형 1과 4로 분류된 섬유들과 함께 하나의 이미지로 합성되어 식 (1)과 같은 섬유분산성 계수가 최종적으로 결정된다.

3. 결과 및 분석

3.1. 섬유의 방향성이 섬유분산성 계수에 미치는 영향

Fig. 10은 2.2.2절에서 기술한 바와 같이 packing density에 의한 형상기준을 0부터 0.5까지 변화시켜 가면서 2.2.1절에 기술된 이미지 프로세싱 절차에 따라 구한 섬유분산성 계수를 나타내고 있다. 기준이 되는 packing density의 값이 커질수록 즉, 보다 원에 가까운 섬유들만을 갖고서 섬유분산성 계수를 계산할수록 섬유분산성 계수의 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 약 0.3 이하의 형상계수를 기준값으로 사용할 경우, 일정한 분산성 계수를 보이는 것으로 나타났다. 이 연구에서 수행한 제한된 조건의 실험을 통하여 약 0.3 이하의 형상계수를 기준으로 할 경우, 일정한 계수를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같이 형상계수가 큰 섬유(섬유의 방향이 촬영방향과 수직에 가까운 섬유)를 제외할수록 분산성 계수가 감소하는 이유는 섬유의 분산성이 방향성(형상계수)과 무관하다는 가정 하에서 긴 형상의 섬유 이미지가 제외되어 매트릭스만으로 채워지는 공간이 증가하기 때문이다. 이와 같은 가정, 즉 섬유의 분산성이 방향성(형상계수)과 무관하다는 가정이 타당성이 있다면, 기준이 되는 packing density의 값에 상관없이 시편 간의 분산

성 상대차가 유지되어야 한다. 이를 증명하기 위하여 기준이 되는 packing density의 변화가 각 시편의 분산성 계수의 상대차에 영향을 주지 않는다는 귀무가설(null hypothesis)을 세우고 분산분석을 통해 가설을 검증하였다.

Table 1은 분산분석 수행 결과를 나타낸다. 이 결과에 따르면 p-value가 0.5317로 계산됨을 확인할 수 있다. 일반적으로 p-value가 0.001보다 작으면 가정한 가설을 받아들일 수 없으며, p-value가 0.10보다 크면 귀무가설을 받아들일 수 있다. 물론 귀무가설을 받아들인다고 하여, 그 가설이 사실이라고 결론지을 수는 없으나[13], 이 검증을 통하여 가설의 타당성을 충분히 판정할 수 있다. 이 가설검증에서는 p-value가 0.10보다 크기 때문에 귀무가설을 받아들일 수 있으며, 가설의 타당성이 있다고 판정할 수 있다. 이러한 결과로부터 단면 촬영에 의하여 섬유분산성을 평가할 때에는 섬유의 방향성을 고려할 필요가 없다는 결론을 얻을 수 있다. 다시 말해서, 형상계수의 기준값을 사용하지 않고 모든 섬유에 대하여 분석을 수행하여도 큰 문제가 없다는 결론을 내릴 수 있다. 다만, 이 연구에서 사용한 시편의 섬유는 촬영단면의 법선 방향으로 1차원적인 배열을 할 가능성이 높은 경우이므로, 3차원 배열을 나타내는 경우의 섬유분산성을 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

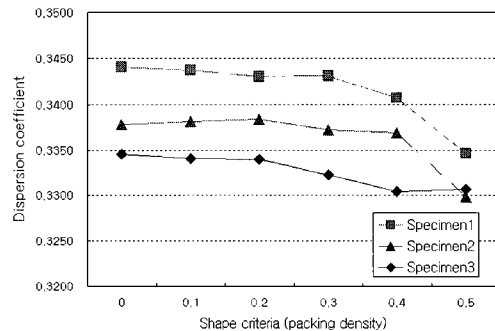


Fig. 10 Dispersion coefficient as a function of shape criteria

Table 1 Analysis of variance (ANOVA) for relative difference between the samples with respect to the dispersion coefficient with varying shape criteria

Source	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Value	p-value
Model	5	0.00004316	0.00000863	0.87	0.5317
Error	11	0.00010926	0.00000993		
Corrected Total	16	0.00015242			

3.2. 개선된 알고리즘의 검출 성능

Fig. 11과 12는 개선된 알고리즘의 검출 성능에 대한 실험 결과를 나타내고 있다. Fig. 11의 A와 B는 전형적인 유형 2에 속하는 섬유들로서 결과를 보면 개선된 알고리즘을 통하여 섬유가 모두 개별적으로 검출된 것을 확인할 수 있다. C는 전형적인 유형 3에 속하는 섬유들로서 역시 정확히 검출된 것을 확인할 수 있다. D와 E는 유형 3에 속하는 것으로서 인접한 2개의 섬유들이 하나의 섬유로 검출되지 않고 각각 검출된 것을 확인할 수 있다. Table 2는 최초에 적용한 섬유분산성 알고리즘과 개선된 알고리즘을 적용한 경우의 시편별 섬유분산성 계수 결과를 나타내고 있다. Table 2에서 보인 바와 같이 개선된 방법을 적용한 결과 섬유분산성 계수는 평균 0.08 정도 작게 나타났으며 시편별 표준편차도 0.0176 크게 나타났다. 개선된 기법을 적용하여 섬유분산성이 보다 불량하게 평가된 이유는 군집 섬유들을 각각의 개별 섬유로 정확히 검출하였기 때문이다. 또한 일반적인 알고리즘을 적용한 경우보다 시편별 표준편차가 더 크게 나온 것은 개선된 알고리즘에서 보다 정확히 섬유를 검출하여

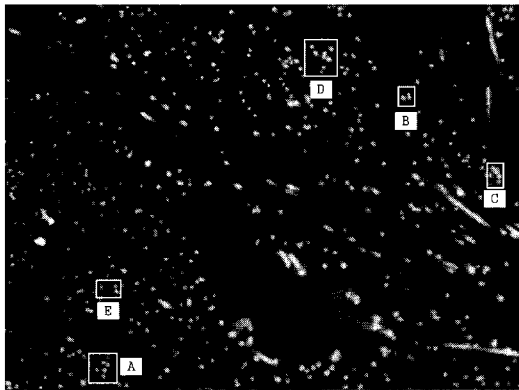
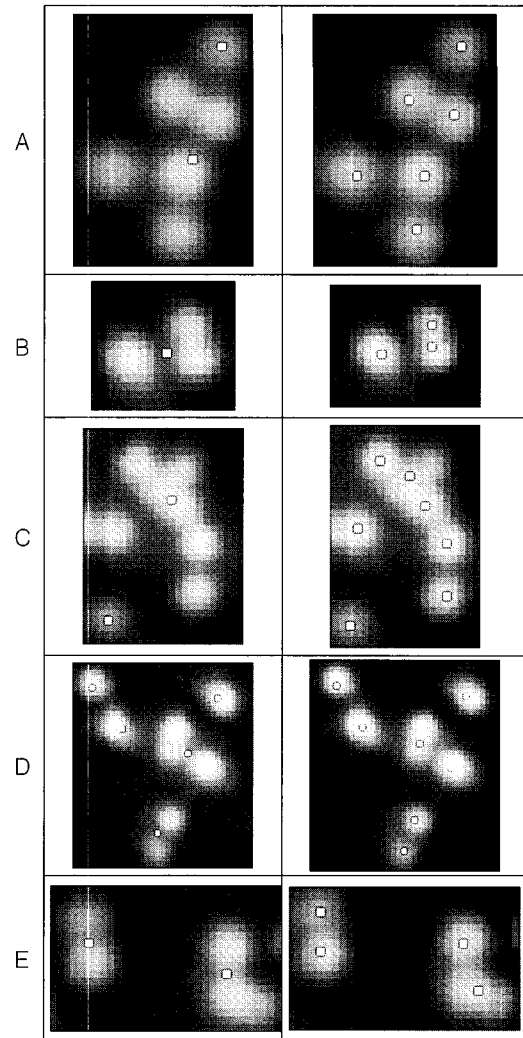


Fig. 11 Grayscale image converted from the cross-sectional fluorescence image

시편 간의 분산성을 보다 명확히 구분 지었기 때문인 것으로 판단된다.



(a) proto-type algorithm (b) enhanced algorithm

Fig. 12 Test results, where the white point located on the grayscale image (fiber) indicates the center of the detected fiber image

Table 2 α_f values calculated by proto-type and enhanced algorithms

Sample	Fiber dispersion coefficient (α_f)	
	proto-type algorithm	enhanced algorithm
Sample #1	0.344	0.246
Sample #2	0.338	0.258
Sample #3	0.335	0.289
Standard deviation	0.0046	0.0222

4. 결 론

섬유복합재료의 섬유분산성을 정량적으로 검출하기 위하여 형광의 원리를 적용하고, 새로운 이미지 프로세싱 알고리즘을 개발하였다. 이 기법의 타당성을 검증하기 위하여 검증 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 섬유의 방향이 촬영 방향과 동일한 섬유(이미지가 원형에 가까운 섬유 또는 형상계수가 큰 섬유)만을 고려하여 섬유의 분산성을 평가하였을 때, 분산성 계수가 감소하는 것으로 나타났다. 약 0.3 이하의 형상계수를 기준으로 사용할 경우, 일정한 분산성 계수를 나타내었다.
- 2) 섬유의 방향성이 섬유분산성 계수에 미치는 영향을 파악하기 위해서 기준이 되는 packing density의 변화가 각 시편에 따른 섬유분산성 계수의 상대적인 차이에 영향을 주지 않는다는 귀무가설을 세우고, 분산분석을 통해 가설검증을 수행하였다. 가설검증을 수행한 결과, 섬유의 방향성이 섬유분산성의 시편 간의 상대차에는 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 단면 촬영에 의하여 섬유분산성을 평가할 때에는 섬유의 방향성을 고려할 필요 없이 모든 섬유에 대하여 분석을 수행하여도 무방한 것으로 결론 내릴 수 있다. 다만, 이 논문에서 수행한 제한된 결론이며, 섬유가 3차원 배열을 나타내는 경우에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 군집형태로 인접한 섬유들이 하나의 섬유로 검출되는 문제점을 개선하기 위하여 검출과정에서 먼저 섬유의 유형을 4가지로 분류한 후 군집형태의 섬유들만 분수령 알고리즘을 통하여 개개의 섬유로 분리하는 알고리즘을 제안하였다. 3개 시편을 갖고서 검증한 결과, 제안한 알고리즘을 적용하여 섬유 검출 성능을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설기술연구개발사업(과제번호: 03산학연A06-04)에 의한 것임을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Y. Y. Kim, H. J. Kong and V. C. Li, "Design of engineered cementitious composite (ECC) suitable for wet-mix shotcreting," *ACI Materials J.*, Vol. 100, No. 6, pp. 511-518, (2003)
- [2] 김윤용, 김정수, 하기주, 김진근, "고로슬래그 미분말이 혼입된 ECC (engineered cementitious composite)의 개발", *한국콘크리트학회 논문집*, 제18권, 제1호, pp. 21-28 (2006)
- [3] V. C. Li, and H. C. Wu, "Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites," *Journal Applied Mechanics Review*, Vol. 45, No. 8, pp. 390-398, (1992)
- [4] V. Massardier-Nageotte, A. Maazouz, G. Peix and S. Bres, "Methodologies for the characterisation of glass fibre orientation and distribution in large components moulded from sheet molding compounds (SMC)," *Polymer Testing*, Vol. 22, No. 8, pp. 867-873, (2003)
- [5] M. Chalfie, "Green fluorescent protein as a marker for gene expression," *Science*, Vol. 263, Issue. 5148, pp. 802-805, (1994)
- [6] S. Torigoe, T. Horikoshi and A. Ogawa, "Study on evaluation method for PVA fiber distribution in engineered cementitious composite," Vol. 1, No. 3, pp. 265-268, (2003)
- [7] S. Beucher and C. Lantuejoul, "Use of watershed in contour detection," in *International Workshop on Image Processing: Real-time edge and motion detection /estimation*. Rennes, France, pp. 17-21, (1979)
- [8] K. Kobayashi, "Fiber reinforced concrete," Tokyo: Ohm-sha.
- [9] A. Ammouche, D. Breyse, H. Hornain, O. Didry, and J. Marchand, "A new image analysis technique for the quantitative assessment of micro-cracks in cement-based materials," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 1, pp. 25-35, (2000)
- [10] N. A. Otsu, "Threshold selection method from

- gray level histogram," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 1, pp. 62-66, (1979)
- [11] 이방연, 김운용, 김진근, "개선된 이진화와 형상분석 기법을 응용한 콘크리트 표면 균열의 화상처리 알고리즘 개발", 한국콘크리트학회 논문집, 제17권, 제3호, pp. 361-368 (2005)
- [12] J. Feng, and H. Lu, "Peak analysis of grayscale image: algorithm and application," International Journal of Information Technology, Vol. 12, No. 5, pp. 11-18, (2006)
- [13] A. J. Hayter, "Probability and statistics," 2nd ed., pp. 377-381, (2002)