

개선된 이진화와 형상분석 기법을 응용한 콘크리트 표면 균열의 화상처리 알고리즘 개발

이방연¹⁾ · 김윤용¹⁾ · 김진근^{1)*}

¹⁾ 한국과학기술원 건설및환경공학과

(2004년 9월 2일 원고접수, 2005년 5월 30일 심사완료)

Development of Image Processing for Concrete Surface Cracks by Employing Enhanced Binarization and Shape Analysis Technique

Bang-Yeon Lee¹⁾, Yun-Yong Kim¹⁾, and Jin-Keun Kim^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-338, Korea

(Received September 2, 2004, Accepted May 30, 2005)

ABSTRACT

This study proposes an algorithm for detection and analysis of cracks in digital image of concrete surface to automate the measurement process of crack characteristics such as width, length, and orientation based on image processing technique. The special features of algorithm are as follows: (1) application of morphology technique for shading correction, (2) improvement of detection performance based on enhanced binarization and shape analysis, (3) suggestion of calculation algorithms for width, length, and orientation. A MATLAB code was developed for the proposed algorithm, and then test was performed on crack images taken with digital camera to examine validity of the algorithm. Within the limited test in the present study, the proposed algorithm was revealed as accurately detecting and analyzing the cracks when compared to results obtained by a human and classical method.

Keywords : concrete crack, crack detection, crack analysis, crack width, image processing

1. 서 론

근래에 콘크리트 구조물에 발생한 균열의 영향에 대한 관심이 커져 과거와 다르게 발생한 균열을 방지하기보다 보수를 통해 그 영향을 최소화시키고자 노력하고 있다. 이와 같이 발생한 균열의 영향을 최소화하기 위하여 일차적으로 발생한 균열에 대한 정확한 계측이 이루어져야 하며, 또한 지속적인 관리를 통하여 균열의 변화에 대한 자료 수집 및 저장이 필요하다. 그러나 대부분의 균열계측은 점검자의 육안조사를 통한 수작업으로 수행되고 있기 때문에 계측에서 뿐만 아니라 자료의 저장에 많은 시간과 인력이 요구되고 또한 점검자의 주관이 개입될 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 연구자들이 화상처리 기법을 적용하고 있다¹⁻⁷⁾. 화상처리를 이용한 균열계측 기법은 컴퓨터가 균열을 자동으로 인식하는 검출 기법과 검출된 균열의 특징들(폭, 길이, 방향)을 계산하는 분석 기

법으로 나눌 수 있는데, 전자의 경우 콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 형상이 랜덤하여 수학적 모델링이 불가능할 뿐만 아니라 콘크리트 구조물은 시공을 한 후 바로 외부 환경에 노출되기 때문에 균열만을 완벽히 검출할 수 있는 기법은 아직 소개되어 있지 않다.

이 연구의 목적은 디지털 카메라나 비디오 카메라로 촬영된 콘크리트 표면 균열 화상에서 컴퓨터가 자동으로 균열을 검출하고 균열의 폭, 길이, 방향을 계산할 수 있는 알고리즘 개발이다. 알고리즘의 전체적 흐름은 균열검출, 균열분석으로 구성된 기존 연구들과 유사하지만¹⁻⁵⁾, 전역적/지역적 이진화(binartization) 과정을 2회에 걸쳐 수행하는 2차 추출 알고리즘을 개발한 것과 형상분석 기법을 도입하여 미세균열의 검출 성능을 현저히 향상 시킨 것이 기존의 알고리즘과 차별화되는 부분이다. 이 외에도 빛의 영향을 보정하기 위하여 새로이 모폴로지 기법을 적용하였고 폭, 길이, 방향을 계산하는 세부 알고리즘을 제시하였다.

* Corresponding author

E-mail : kimjinkeun@kaist.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

2. 균열 검출 및 분석 알고리즘

2.1 개요

이 연구에서 제안하는 균열 검출 및 분석 알고리즘의 개요도는 Fig. 1과 같다. 디지털 카메라나 비디오 카메라로 촬영된 균열화상은 먼저 빛의 영향이 제거되고 이진화와 형상분석 과정을 통하여 배경 및 다른 물체들로부터 균열이 검출된다. 검출된 균열은 전처리 과정을 통해 최종적으로 균열의 폭, 길이, 방향이 계산된다. 최종적으로 계산된 폭과 길이 값들은 화상확대 과정에서 결정되는 하나의 화소가 나타내는 실제 길이(촬영면적/카메라의 해상도 : mm/화소)가 고려되어 실제 균열에 해당하는 값이 된다.

2.2 균열검출 알고리즘

2.2.1 빛의 영향 보정

카메라를 이용하여 촬영한 균열을 포함한 화상은 콘크리트 면을 촬영할 때 콘크리트 면에 비치는 빛의 양이 위치에 따라 다르기 때문에 배경의 밝기가 달라지게 된다. 따라서 이러한 빛의 영향을 보정하지 않고 이진화 기법을 적용할 경우 배경이 어두운 부분에서는 균열을 추출할 수 없게 된다. 이러한 빛의 영향을 보정하기 위하여 이 연구에서 적용하는 기법은 화상처리 기법 중 하나인 모폴로지(morphology) 기법이다⁹⁾. 모폴로지 기법은 기본적으로 erosion, dilation, opening, closing 4가지 연산에 근간을 두며, 이 연구의 경우 원 화상에서 closing 연산을 수행한 화상을 빼는 방법을 사용하였다. 이때 사용한 구조적 요소(structuring elements)의 크기는 반지름이 15인 원을 사용하였다. Fig. 2는 모폴로지 기법을 적용한 한 예로서 (b)는 모폴로지 기법을 적용하여 배경의 밝기를 보정한 화상이며, (c)와 (d)는 각각 원화상과 밝기가 보정된 화상의 A-A 단면의 밝기값들을 그래프로 표현한 것이다. 그림에 나타나듯이 빛의 영향을 효과적으로 보정하고 있음을 확인할 수 있다.

2.2.2 이진화에 의한 균열 추출

화상에서 추출하고자 하는 물체를 배경과 다른 물체로부터 추출해 내는 일반적인 방법은 이진화 기법이다. 이진화란 다양한 밝기값(0~255: grayscale)을 가진 화소들을 임의의 역치값(threshold)을 기준으로 화소의 밝기값을 흰색(1)과 검은색(0)으로 바꾸는 것이다. 이 연구에서 기본적으로 채택한 방법은 다양한 이진화 기법들 중에서 Otsu가 제안한 판별함수기법이며^{10,11)}, Fig. 1과 같이 노이즈 감소, 지역적 이진화를 연산과정에 추가하였다. 또한 미세균열 검출 성능을 향상시키기 위하여 1차 추출 이후에 2차 추출 과정을 추가하였다.

노이즈를 감소시키기 위한 연산은 각 화소 주위의 3×3

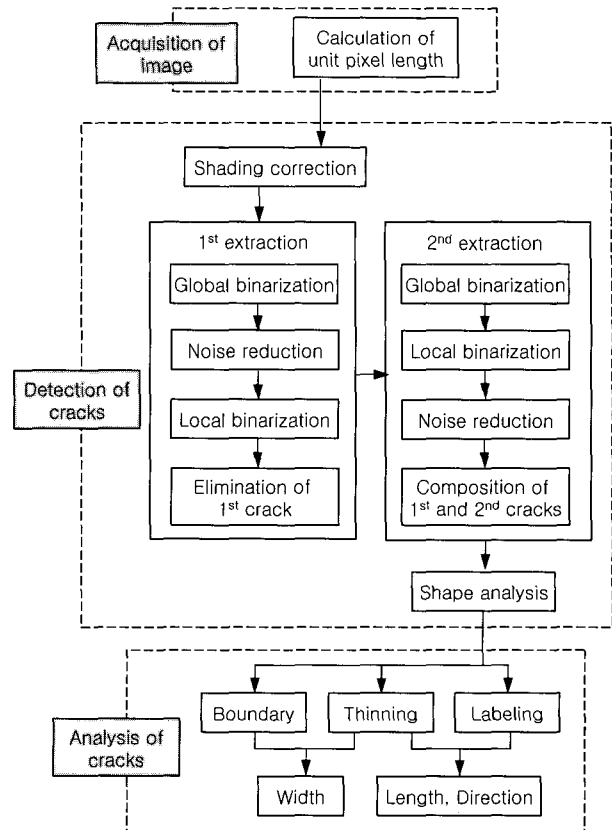
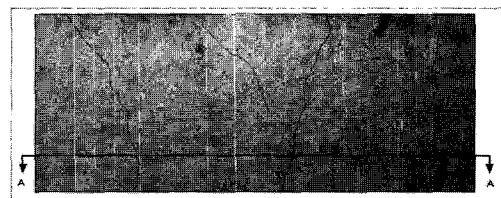
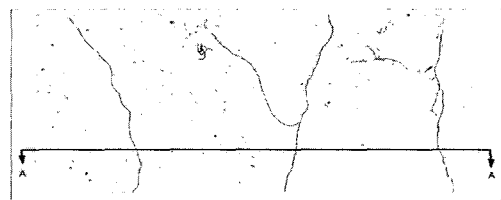


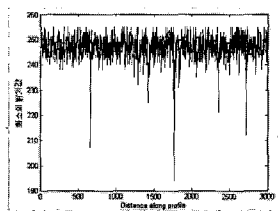
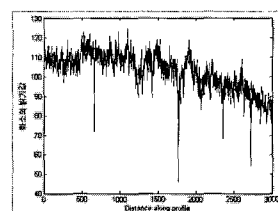
Fig. 1 Flow chart of crack detection and analysis algorithm



(a) Original image



(b) Corrected image



(c) Before shading correction (d) After shading correction

Fig. 2 Shading correction using morphology

크기의 인접화소인 9개의 화소값들 중에서 1을 가진 화소들이 더 많으면 중심 화소의 값은 1이 되고 0을 가진 화소들이 더 많으면 0이 되는 것으로서 이 연산을 통하여 미세한 노이즈를 제거할 수 있을 뿐 아니라 이 후의 연산 시간을 단축 할 수 있다. 지역적 이진화는 전역적 이진화 연산을 통하여 균열로 추출된 경계를 따라 미세 영역내에서의 연산을 의미한다. 이 때 미세 영역의 크기는 경계 화소 주위의 11×11 영역으로 하였으며, 반복횟수는 5회로 하였다. Fig. 3은 지역적 이진화의 한 예를 나타낸 것으로서 (b)에 나타나듯이 전역적 이진화의 결과(흰색)와 비교하여 보다 정확히 균열을 검출하고 있다(검정색). 그러나 지역적 이진화는 전역적 이진화를 통해 추출된 균열의 경계만을 따라 이진화가 수행되기 때문에 지역적 이진화가 수행되는 영역 밖에 있는 화소의 밝기값이 배경의 밝기값과 비슷한 미세 균열은 검출할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 2차 추출을 추가하였다. 2차 추출도 1차 추출과 동일하게 Otsu 방법을 사용하여 역치값이 결정되도록 하였으며, 지역적 이진화 과정을 포함하였다. 그리고 2차 추출의 지역적 이진화에서 연산이 되는 영역의 크기는 1차 추출과 동일하나 반복횟수는 2회로 하였다. 다만, 2차 추출에서는 1차에서 균열로 추출된 것들을 제거한 화상을 사용하기 때문에 역치값이 1차 추출 때보다 배경의 밝기값과 비슷한 값으로 결정된다. 따라서 배경의 밝기값과 비슷한 미세 균열도 검출될 수 있다. 그러나 이러한 역치값으로 인하여 미세균열 검출이 가능한 반면 균열 이외에도 많은 노이즈들이 균열로 추출된다. 따라서 이러한 노이즈들과 균열을 분리하기 위하여 균열의 형상이 폭에 비하여 길이가 긴 특성을 이용한 2.2.3절의 형상분석을 사용하였다.

2.2.3 형상분석에 의한 균열 검출

Packing density의 정확한 의미는 물체의 면적을 물체의 외접원에 해당하는 면적으로 나눈 값이다⁸⁾. 그러나 물체의 정확한 외접원을 구하기 어렵고 계산시간도 오래 걸리기 때문에 이 연구에서 Packing density를 새로이 다음과 같이 정의하였다. 수정된 Packing density는 Fig. 4와 같이 물체의 외접원 대신 물체를 외접하는 직사각형의 외접원을 사용하고, 이를 수식으로 나타내면 다음 식 (1)과 같다.

$$F_{\sigma} = \frac{A_{ob}}{A_{mcc}} \quad (1)$$

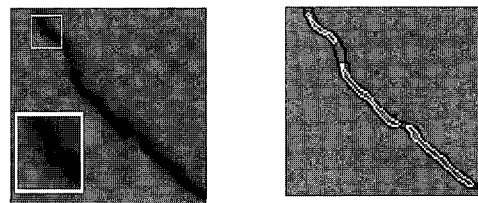
여기서 A_{ob} 는 물체의 면적이고, A_{mcc} 는 물체를 외접하는 직사각형의 외접원에 해당하는 면적이다. Fig. 4(a)와 같이 균열과 유사한 형태일 경우 F_{σ} 은 0에 가까운 값을 나타내고, Fig. 4(b)와 같이 원에 가까운 형태일 경우, F_{σ} 은 1에 가까운 값을 나타낸다. 이 연구에서는 실제 균열에 대한 시험을 통하여 균열을 다른 형상의 물체로부터 구분할 수 있는 기준값을 0.12로 정하였다.

2.3 균열 분석 알고리즘

균열의 폭, 길이, 방향을 구하기 위하여 Fig. 5와 같은 thinning¹²⁾, boundary, labeling¹³⁾의 전처리 과정이 필요하다. thinning은 Fig. 5(b)와 같이 물체의 골격이 되는 중심 화소만 남기는 것이고, boundary는 물체의 경계만 남기는 것이다. 마지막으로 labeling은 각 균열에 고유의 번호를 부여하는 것이다.

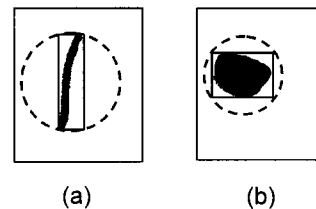
2.3.1 균열의 폭

이 연구에서 제시한 균열의 폭을 구하는 알고리즘의 개요도는 Fig. 6과 같다. thinning과 boundary의 전처리 과정이 수행된 화상은 Fig. 7과 같이 경계와 중심 화소만 남게 된다. 균열의 폭은 중심 화소로부터 양쪽 경계까지 가장 짧은 거리로 정의되며, 전처리 과정이 끝난 화상에 Fig. 8과 같은 각각의 거리 필터를 중심 화소로부터 A, B, C, D 영역(40×40 화소)에 적용하여 경계 화소들 중 거리



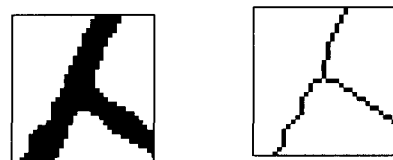
(a) Local binarization (b) Result

Fig. 3 Local binarization and result

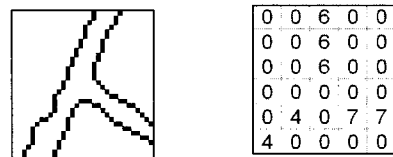


(a) (b)

Fig. 4 Modified packing density



(a) Original image (b) Thinned image



(c) Boundary image (d) Labeled image

Fig. 5 Preprocess for crack analysis

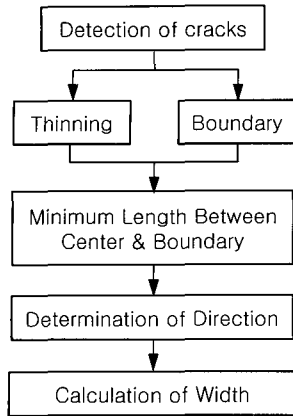


Fig. 6 Flow chart of algorithm for crack width

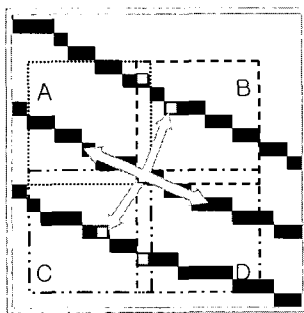


Fig. 7 Diagram of algorithm for crack width

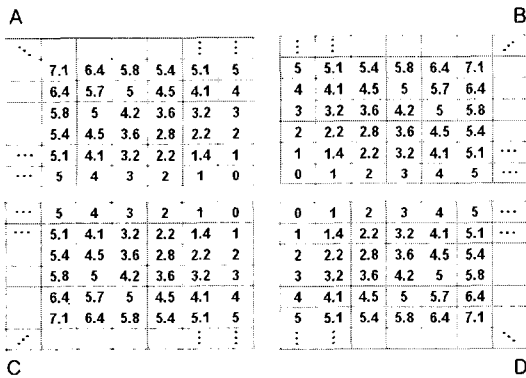
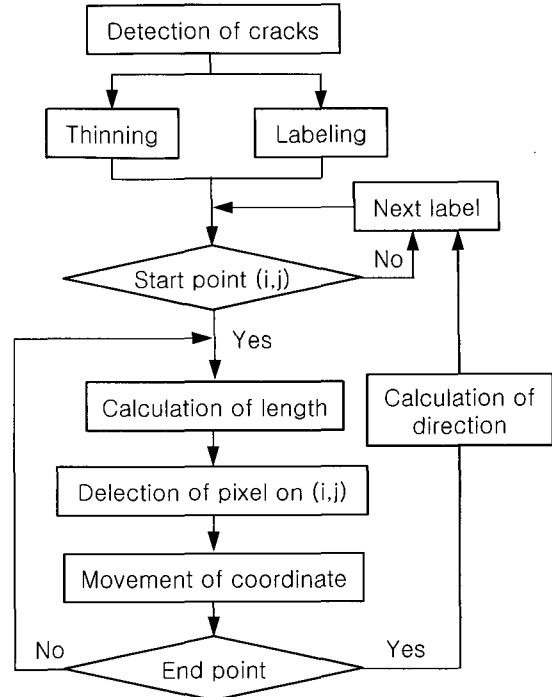


Fig. 8 Distance filter for crack width

가 가장 짧은 4개의 값들이 선택된다. 균열의 방향이 결정되면 4개의 값 중에서 균열의 방향과 수직인 두 개 값이 선택되며, 마지막으로 이 두 값의 합에 하나의 화소가 나타내는 실제 길이를 곱하여 균열의 폭이 계산된다.

2.3.2 균열의 길이와 방향

이 연구에서 제시한 균열의 길이와 방향을 구하는 알고리즘의 개요도는 Fig. 9과 같다. 전처리 과정으로 thinning과 labeling 과정이 수행된 화상은 Fig. 5(d)와 같이 각 균열 별로 고유 번호가 부여된 한 화소의 두께를 가진 화상



Condition of start point $a = 0$ or 1
 $\sum p(i \pm a, j \pm b) = 2 \times \text{label number}$ $b = 0$ or 1

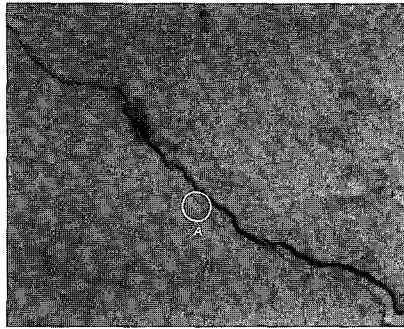
Fig. 9 Flow chart of crack length and direction algorithm

으로 바뀌게 된다. 이러한 화상을 가지고 각 균열 별로 시작점의 조건을 만족하는 점을 찾아 화소를 이동하면서 끝점에 해당하는 화소까지 수직, 수평 방향은 1을 대각선 방향은 $\sqrt{2}$ 를 곱한 값들을 모두 더한 후, 하나의 화소가 나타내는 실제 길이를 곱하여 최종적으로 균열의 길이가 계산된다. 균열의 방향은 각 균열의 시작점 (x, y) 과 끝점 (x', y') 의 좌표를 이용하여 식 (2)와 같이 계산된다.

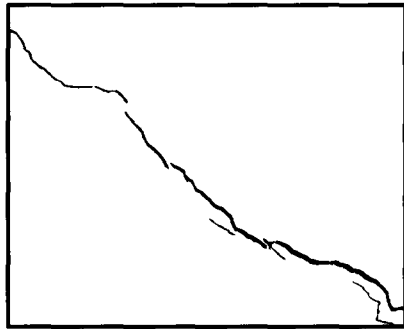
$$\angle(i) = \frac{180}{\pi} \times \tan^{-1} \left\{ \frac{y'(i) - y(i)}{x'(i) - x(i)} \right\} \quad (2)$$

3. 검증 및 고찰

이 연구에서 제시한 균열 검출 및 분석 알고리즘은 MATLAB을 이용하여 구현하였으며, 성능 검증을 위하여 실제 콘크리트 표면을 촬영한 화상을 사용하였다. 촬영에 사용된 카메라는 NIKKOR AF-S 28mm ~ 70mm 렌즈가 부착된 N사의 DIX 모델이다. Figs. 10 ~ 12까지는 검출 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10 (b)의 검출 결과를 살펴보면 주 균열과 떨어져 있는 A부분 근처의 미세균열이 검출된 것을 확인할 수 있다. 이는 2.2.2절에서 전술한 바와 같이 2차 추출을 추가하였기 때문에 가능한 것이다. A부분의 미세균열이 일부 검출되지 않은 이유는 검출되지 못한 미세균열의 형상계수가 0.12보다 크기 때문이다. 형상

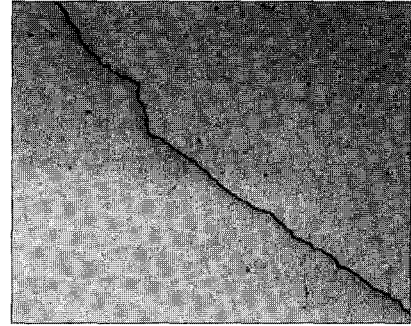


(a) Test image

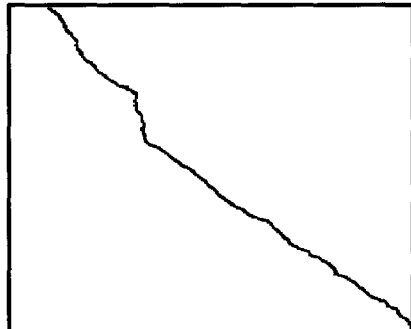


(b) Test result

Fig. 10 Test result of crack detection for specimen 1



(a) Test image

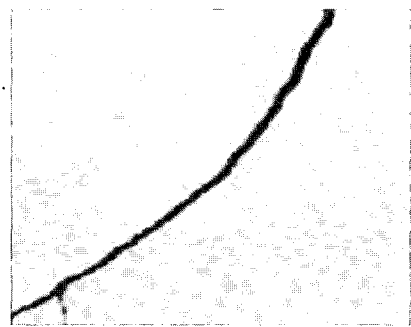


(b) Test result

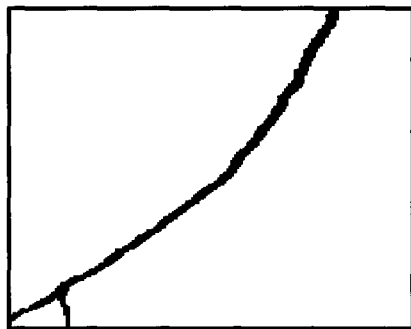
Fig. 11 Test result of crack detection for specimen 2

계수의 기준을 0.12보다 더 크게 하여 검출되지 못한 미세 균열을 검출할 수도 있지만 형상계수의 기준값이 증가함에 따라 노이즈도 균열로 검출되는 비율이 증가하기 때문이다. 이 수치는 경험적으로 결정되는 값이며, 추후 이 연구에서 사용한 형상계수 이외에 사람의 판단을 모사할 수 있는 인공지능기법(퍼지, 신경망 등)이 필요할 것으로 판단된다. Fig. 11은 이 연구에서 제시한 균열 검출 알고리즘이 다른 노이즈(타설할 때 기포로 인하여 발생한 표면의 작은 구멍과 이물질들)로부터 균열만을 검출하는데 효과적임을 보여주고 있으며, Fig. 12에서 나타나듯이 가지 형태로 뻗어 나온 균열에 대해서도 효과적임을 알 수 있다.

Table 1은 임의의 균열에 대하여 카메라의 초점거리와 촬영거리를 달리하면서 5개의 측정점에서 계산 혹은 계측된 균열 폭을 나타낸다. 다양한 초점거리와 촬영거리로 획득한 균열 화상을 갖고서 계산한 값의 표준편차는 0.024~0.047의 범위였으며 평균 0.035로 나타났다. 동일 지점의 균열 폭에 대하여 초점거리와 촬영거리에 따라 상이한 결과가 나타나는 이유는 분해능(하나의 화소가 나타내는 길이)이 서로 다르기 때문이다. 분해능이 클수록 보다 정확한 균열 특성 값을 계산하는 것이 일반적 결과이다. Table 1의 계산 결과에서도 이와 같은 경향이 나타났으나, 실험한 범위 내에서는 큰 차이가 발생하지 않았다. Table 1의 평균값과 동일한 측정에서 0.1mm 눈금의 상용 확대경을 사용하여 측정된 값을 Table 2에서 비교하였다. 2가지 방법에 의하여 결정된 값의 차이를 정량화하기 위하여 식(3)과 같은 간단한



(a) Test image



(b) Test result

Fig. 12 Test result of crack detection for specimen 3

수식을 도입하였으며, 식 (3)에 의하여 계산된 차이는 0.67~5.9%의 범위(평균 3.8%)인 것으로 나타났다.

Table 1 Effect of focal length of camera and distance between camera and concrete surface

Distance between camera and cracks (mm)	Focal length (mm)	Unit pixel length (mm/pixel)	Measurement point				
			1	2	3	4	5
865	28	0.209	1.05	1.49	0.89	-	-
865	50	0.119	-	1.48	0.84	0.84	-
865	70	0.085	-	-	0.82	-	-
1200	28	0.299	1.02	1.57	0.90	0.90	1.02
1200	50	0.171	-	1.55	0.83	0.86	1.07
1200	70	0.124	-	1.48	0.82	0.87	-
1915	50	0.286	1.10	1.50	0.86	0.86	0.98
1915	70	0.207	-	-	0.83	0.83	-
Average (mm)			1.05	1.51	0.85	0.86	1.02
Standard deviation (mm)			0.037	0.036	0.030	0.024	0.047

* Numerical difference between W_c and W_m with respect to W_c (%)

Table 2 Comparison of crack width

	Measurement point				
	1	2	3	4	5
W_c : width calculated by proposed technique (mm)	1.05	1.51	0.85	0.86	1.02
W_m : width measured by crack microscope (mm)	1.0	1.5	0.8	0.9	1.0
$\frac{ W_c - W_m }{ W_m } * 100$ (%)	5.5	0.67	5.9	4.7	2.3

Table 3 Comparison of crack length

	Measurement point							
	1	2	3	4	5	6	7	8
L_c : length calculated by proposed technique (mm)	680.6	312.3	614.4	561.5	112.6	121.3	539.7	130.3
L_m : length measured by ruler (mm)	630	300	580	540	100	100	500	116
$\frac{ L_c - L_m }{ L_m } * 100$ (%)	8.03	4.10	5.93	3.98	12.6	21.3	7.94	12.3

Table 4 Comparison of crack direction

	Measurement point							
	1	2	3	4	5	6	7	8
D_c : direction calculated by proposed technique (mm)	-71.6	-74.4	72.1	-63.4	-61.7	78.8	65.7	82.3
D_m : direction measured by protractor (mm)	-70	-75	73	-65	-60	78	66	83
$\frac{ D_c - D_m }{ D_m } * 100$ (%)	2.2	0.85	1.3	2.4	2.8	0.96	0.67	0.86

$$Relative\ difference = \frac{|W_c - W_m|}{|W_m|} \times 100 \quad (3)$$

여기서, W_c 는 균열 검출 결과로부터 계산된 값이고 W_m 은 확대경으로 측정된 값이다.

총 8개 균열의 길이를 계산하여, 그 결과를 1mm 눈금의 자로 측정된 값과 비교하였다(Table 3). 식 (3)과 동일한 방식으로 결정된 차이는 3.98~21.3%의 범위이며, 평균 9.5%로 나타났다. 균열 폭(평균 3.8%)에 비하여 차이가

크게 나타난 이유는 균열 시/중점의 직선 거리를 차로 측정하여 이 값을 균열 길이로 간주하였기 때문이다. 동일한 8개의 균열에 대하여 균열의 방향도 계산하였다. 이 계산 결과는 눈금 1°의 각도기를 사용하여 측정한 값과 비교하였다(Table 4). 이때에 2가지 방법의 차이는 0.85~2.8%의 범위에 해당되며, 평균값은 약 1.5%인 것으로 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서는 디지털 카메라를 통하여 획득한 콘크리트 균열 화상에서 균열의 특징들을 PC를 통해 자동으로 분석할 수 있는 알고리즘을 제시하였으며, 결론은 다음과 같다.

- 1) 균열이 포함된 콘크리트 면을 촬영할 때 빛의 양이 위치에 따라 다르기 때문에 발생하는 빛의 영향을 보정하기 위하여 새로이 모폴로지 기법을 적용하였고, 효과적으로 빛의 영향을 보정할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 기존 연구내용을 바탕으로 배경, 노이즈, 균열이 함께 있는 화상에서 이진화 기법과 형상 분석 기법을 응용하여 균열 검출 성능을 향상시켰으며, 기존 검출 시스템에서 검출하기 어려웠던 미세 균열까지 검출할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 그러나 이 연구에서 균열 검출 알고리즘의 효율성 검증에 사용한 균열 화상은 비교적 노이즈가 적게 포함된 화상이었기 때문에 유해환경에 노출되어 많은 노이즈가 포함된 균열 화상이나 실제 균열이 아니지만 균열과 유사한 형태의 물체가 있는 화상의 경우 균열 검출에 오차가 있을 것으로 예상된다. 이러한 문제들은 추후 사람의 판단을 모사할 수 있는 인공지능 기법의 도입이 필요할 것으로 판단된다.
- 3) 검출된 균열을 바탕으로 균열의 폭, 길이, 방향을 자동으로 계산할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 이 연구에서 실험한 촬영 조건은 일반적으로 현장에서 접할 수 있는 범위로 선정하였으며, 그 영향을 검토한 결과 무시할 수 있는 수준인 것으로 나타났다. 또한 균열 현미경으로 측정된 값과 비교함으로써 이 연구에서 제시한 알고리즘의 실효성을 검증하였다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강준목, 오영철, 엄대용, “수치영상처리에 의한 콘크리트 구조물의 균열정보 획득”, 대한토목학회논문집, 22권 5-D호, 2002, pp.1001~1010.
2. Schutter, G. D., “Advanced Monitoring of Cracked Structures Using Video Microscope and Automated Image Analysis”, *NDT & E International : Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol.35, No.4, 2002, pp.209~212.
3. Doihara, T., Hirono, K., and Oda, K., “Crack Measuring System Based on Hierarchical Image Processing Technique”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.29 No.5, 1993, pp.155~159.
4. Ito, A., Aoki, Y., and Hashimoto, S., “Accurate Extraction and Measurement of Fine Cracks from Concrete Block Surface Image”, *IEEE Industrial Electronics Society*, Vol.3, 2002, pp.2202~2207.
5. Kaseko, M. S. and Ritchie, S. G., “A Neural Network Based Methodology for Pavement Crack Detection and Classification”, *Transportation Research Part C, Emerging Technologies*, Vol.1, No.4, 1993, pp.275~291.
6. Tung, P. C., Hwang, Y. R., and Wu, M. C., “The Development of a Mobile manipulator Imaging System for Bridge Crack Inspection”, *Automation in Construction*, Vol.11, No.6, 2002, pp.717~729.
7. Liu, Z., Suandi, S. A., Ohashi, T., and Ejima, T., “A Tunnel Crack Detection and Classification Systems Based on Image Processing”, *Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering*, No. 4664, 2002, pp.145~152.
8. Ammouche, A., Breyse, D., Hornain, H., Didry, O., and Marchand, J., “A New Image Analysis Technique for The Quantitative Assessment of Micro-cracks in Cement-Based Materials”, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.1, 2000, pp.25~35.
9. Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., “*Digital Image Processing*”, 2nd ed., Addison Wesley, New York, 1992.
10. Otsu, N. A. “Threshold Selection Method from Gray Level Histogram”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.SMC-9, No.1, 1979, pp.62~66.
11. Seul, M., O’Gorman, L., and Sammon, M. J., “*Practical Algorithms for Image Analysis*”, Cambridge University Press, New York, 2000.
12. Haralick, R. M and Linda, G. S., “*Computer and Robot Vision*”, Vol.I, Addison-Wesley, 1992, pp.28~48.
13. Jain, A. K., “*Fundamental of Digital Image Processing*”, Prentice Hall, USA, 1989, 383pp.

요 약

이 연구의 목적은 디지털 카메라나 비디오 카메라로 촬영된 콘크리트 표면 균열 화상에서 컴퓨터가 자동으로 균열을 검출하고 균열의 폭, 길이, 방향을 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하는 것이다. 개발한 알고리즘의 기본 구조는 기존의 연구 결과들과 유사하며, 기존 연구들과의 차이점은 다음과 같다. (1) 빛의 영향을 제거하기 위한 모폴로지 기법의 적용, (2) 개선된 이진화 기법과 형상 분석을 통한 검출 성능 향상, (3) 폭, 길이, 방향 계산을 위한 세부 알고리즘을 제시한 것이다. 제시한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 MATLAB 언어를 이용하여 알고리즘을 구현하였으며, 디지털 카메라를 통하여 얻은 실제 균열 화상을 사용하여 시험하였다. 시험결과는 제시한 알고리즘이 균열을 정확히 검출할 수 있음을 나타냈으며, 이 연구에서 제시한 방법으로 계산한 균열의 폭, 길이, 그리고 방향의 값을 균열 폭 측정 현미경, 자, 그리고 각도기로 측정한 값과 비교한 결과 거의 일치된 결과가 나타났다.

핵심용어 : 콘크리트 균열, 균열 검출, 균열 분석, 균열 폭, 화상처리
