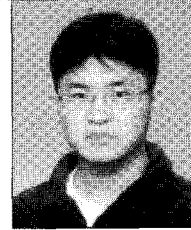


디지털 화상처리 기법을 이용한 콘크리트 표면 균열 계측

Measurement of Concrete Surface Cracks Based on Digital Image Processing



김윤용*



이방연**

*충남대학교 토목공학과 교수

**미시간대학교(美) Post-Doc.

1. 서론

콘크리트의 표면 균열을 계측하여 분석하는 것은 콘크리트 구조물의 유지관리 측면에서 가장 기본적이고 중요한 작업이기 때문에 콘크리트 유지관리 업무에서 가장 많은 시간과 인력이 요구된다. 현재까지 대부분의 실무에서는 균열자와 균열현미경(crack microscope)과 같은 비교적 단순한 장비를 이용하여 균열을 계측하고 있으나 이러한 방식은 측정자와 주위 상황에 따라 주관성이 개입될 여지가 많기 때문에 동일 균열에 대하여 계측 값이 달라질 가능성이 높다. 또한 이러한 전통적인 방법은 계측한 자료의 추가적인 분석을 위하여 이를 전산화하는 작업이 추가로 필요한 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완할 수 있는 방법 중에 하나가 디지털 화상처리 기법을 이용하여 균열을 계측하는 방법이다. 본 기고에서는 디지털 화상처리의 원리를 간단히 설명하고, 균열의 폭, 길이, 방향 등 균열의 특징이 되는 값들을 계산할 수 있는 몇 가지 알고리즘을 소개하고자 한다.

2. 디지털 화상처리 기법 개요

화상처리 기법은 콘크리트 균열 계측 및 분석을 자동화 및 정량화하기 위해서 일반적으로 사용되는 기법들이다. 화

상처리 기법은 처리하고자 하는 방법에 따라 광학, 아날로그, 디지털 화상처리로 구분할 수 있다. 광학 화상처리는 렌즈를 이용하여 화상을 처리하는 것이고, 아날로그 화상처리는 전기 신호를 아날로그 상태로 처리하는 것이다. 마지막으로 디지털 화상처리는 아날로그 신호를 디지털로 바꾸어 이를 처리하는 것이다. 최근에는 컴퓨터의 발달과 더불어 자료의 처리 및 저장에 용이한 디지털 화상처리가 주를 이루고 있다. 디지털로 화상처리를 하기 위해서는 일차적으로 디지털 화상을 얻어야 하는데 일반적으로 디지털 카메라나 비디오 카메라를 사용한다. 디지털 카메라의 원리는 렌즈를 통해 들어온 빛을 CCD(Charge-Coupled Device)를 이용하여 전기신호로 변환시킨 후 ADC(Analog-Digital Converter)를 거쳐 디지털로 변환하여 저장하는 것이다(William, 2002)(그림 1). 디지털 카메라는 빛을 디지털로 바꾸어 저장하기 때문에 연속적인 신호(빛)가 이산적인 신호(숫자)로 바뀌게 되며, 화소(pixel)라고 하는 이미지 최소단위들의 집합체로 구성된다. 따라서 화소의 개수에 따라 화상의 질이 결정되며, 하나의 화소가 나타내는 실제 면적은 촬영면적과 화소의 개수에 의해 결정된다.

디지털 화상처리는 이러한 화소를 기본 단위로 각 화소가 갖게 되는 빛의 정보에 목적에 맞는 처리를 하는 것이며, 대략적인 분야, 목적 및 처리기법들은 표 1과 같다.

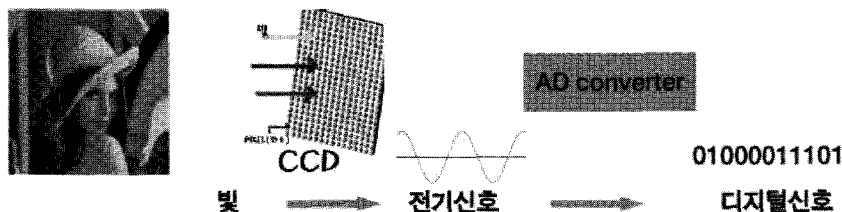


그림 1 디지털 화상처리의 과정

표 1 디지털 영상처리의 분야, 목적 및 처리기법

| 분야 | 목적 | 처리기법 |
|--|--|---|
| 영상 향상 (Image Enhancement) | 추가적인 분석이나 display를 위하여 영상의 어떤 특징을 강조하는 것 | Contrast enhancement Histogram equalization Noise filtering Edge sharpening Smoothing |
| 영상 복원 (Image Restoration) | 원래의 영상으로 복원하는 것 | Deblurring Noise filtering Correction of geometric distortion Inverse filtering |
| 영상 분석 및 이해 (Image Analysis and Understanding) | 영상에 포함된 물체나 의미를 분석하고 이해하는 것 | Boundary descriptor Regional descriptor Pattern recognition Artificial intelligence technique(Artificial neural network, Fuzzy theory, etc.) |
| 영상 재구성 (Image Reconstruction) | 투영된 영상으로부터 원래 영상을 복원하는 것 | Tomography Transformation(Hough, Radon, etc.) |
| 영상 데이터의 압축 (Image Compression) | 영상을 나타내기 위해 필요한 데이터의 양을 줄이는 것 | Lossless coding Lossy compression Image compression standard(JPEG, MPEG, etc.) |

3. 균열 화상처리 기법의 원리

디지털 화상처리는 보통 알고리즘 형태로 표현되는 처리 과정을 포함한다. 그러므로 화상 획득과 출력을 제외한 대부분의 화상처리 기법들은 소프트웨어로 구현된다(Gonzalez, 1987). 따라서 컴퓨터로 구현이 용이하기 때문에 많은 연구자들이 화상처리 기법을 이용하여 균열을 분석하려는 연구를 수행하고 있다. 디지털 화상처리 기법을 이용하기 위해서는 디지털 화상정보를 얻어야 하는데 가장 보편화되어 있는 디지털 카메라를 이용할 수 있으며, 적외선, 레이더 등의 마이크로파를 소스로 하여 화상정보를 취득할 수도 있다. 디지털 카메라를 이용할 경우 추가적인 과정없이 바로 인간이 인식하는 것과 동일한 화상을 얻을 수 있는 반면 다른 장비를 사용할 경우 추가적인 과정이 필요하다. 그러나 일단 인간이 인식하는 것과 동일한 화상을 얻게 되면 이후의 과정은 어떤 장비를 이용하여 화상정보를 획득하든지 유사하다. 본 기고에서는 디지털 카메라를 이용하여 획득한 화상을 처리하는 과정을 중심으로 기술하고자 한다.

화상처리 기법을 이용하여 균열을 분석하는 과정은 디지털 화상(회색 화상 즉, 각 화소는 0부터 255의 밝기 값을 갖게 됨)으로부터 균열을 검출하고 검출된 균열을 바탕으로 이를 분석하는 것으로 구성된다. 여기서 디지털 화상을 RGB(red, green, blue)로 이루어진 컬러 화상(Color Image)을 사용하지 않고 주로 회색 화상(Gray Image)을 사용하는 이유는 화상처리 과정에서 회색 화상을 사용하는 것이 데이터의 처리 속도가 빠르며, 균열의 검출에 있어서 균열의 특징을 추출하는데 컬러와 회색에 따른 차이가 거의 없기 때문이다. 균열 화상처리 기법은 일반적으로 배경, 균열, 균열 이외의 손상 등을 포함하는 균열 화상에서 균열만을 검출하는 균열 검출 알고리즘과 균열만 검출한 화상에서 균열의 폭, 길이, 방향과 같은 균열의 특징에 대한 정보를 얻는 균열 분석 알고리즘으로 구성된다. 그림 2는 일반적인 균열 화상처리 과정을 나타낸다. 디지털 카메라, 비디오 카메라 등을 이용하여 얻은 화상 데이터는 앞에서 기술한 바와 같이 추가적인 화상처리를 용이하게 하기 위하여 영상 향상 기법이 적용되고, 분할(Segmentation)이라는 과정을 통해 각

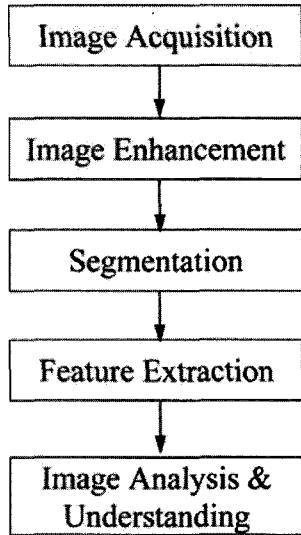


그림 2 균열 화상처리의 일반적인 과정

화소 단위로 저장된 숫자가 의미를 갖게 된다. 즉, 분할과정을 거치고 나면 물체와 배경이 분리된다. 다음 과정은 배경과 분리된 다양한 물체들로부터 의미 있는 물체를 분리하게 되는데 이를 위하여 각 물체의 특징을 추출하게 된다. 이 과정이 특징 추출(Feature Extraction)에 해당되며, 여기까지의 과정이 균열 검출에 해당된다. 최종적으로 검출된 균열 정보로부터 균열의 폭, 길이, 방향, 분포 특성 등의 정보를 얻는 과정이 화상 분석 및 이해의 과정이다. 이러한 과정은 전술한 바와 같이 일반적인 균열 화상처리 과정이며 각 연구자 별로 검출 성능 및 추가적인 분석을 위하여 순서를 바꾸거나 추가적인 화상처리 기법을 적용하고 있다.

4. 균열 검출 알고리즘

콘크리트 표면으로부터 균열을 검출하기 위해서는 많은 노이즈를 포함하고 있는 화상으로부터 균열이 갖고 있는 특징들을 효과적으로 구분해 낼 수 있는 기법들을 적용하여야 한다. 가장 일반적으로 사용되는 방법은 이진화 기법과 형상계수를 이용한 기법이다. 이진화 기법은 다양한 밝기를 가진 화상에서 배경과 물체를 구분하기 위하여 임의의 역치값 미만의 값을 가진 화소는 0(검정색)으로 역치값 이상의 화소는 1(흰색)로 변환하는 것이다(그림 2). 따라서 이진화 기법에서 가장 중요한 것은 최적의 역치값을 결정하는 것이다. 그러나 보통의 물체 검출과는 다르게 콘크리트 표면을 촬영한 화상은 빛의 영향에 의해 배경의 밝기가 일정하지 않기 때문에 이를 고려하지 않고 이진화를 할 경우, 배경이 어두운 부분에서는 배경과 균열이 모두 검은색으로 나타나서 균열을 검출할 수 없게 된다(그림 3). 이러한 빛의 영향

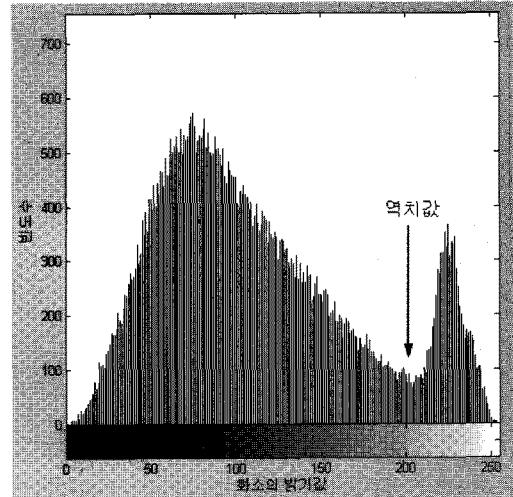


그림 3 화상의 히스토그램과 역치값

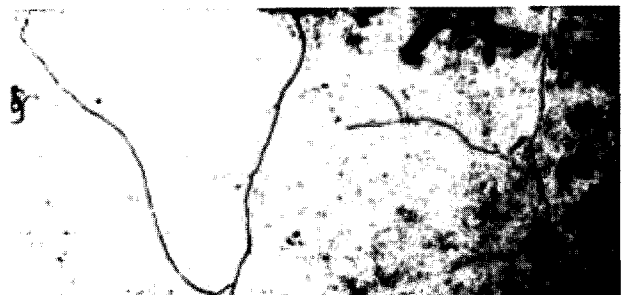


그림 4 빛에 의한 영향

을 최소화하기 위해서 Ito 등(2002)은 본격적인 균열면 촬영에 앞서 화이트 보드 화상을 촬영하였다. 그리고 균열 화상을 화이트 보드 화상으로 나눔으로써 빛의 영향을 제거하였다. 또한 Kaseko와 Ritchie(1993)는 화상 정규화 기법을 사용하였는데, 이 기법은 각 화소의 밝기 값에 밝기보정계수를 곱함으로써 빛의 영향을 제거하는 것이다. 이방연 등(2005)은 모폴로지(morphology) 기법을 사용하였는데, 모폴로지 기법은 erosion, dilation, opening, closing 4가지의 연산에 근간을 두며, closing된 화상에서 원래 화상을 뺄으로써 빛의 영향이 제거된 화상을 얻었다. closing 연산은 dilation 연산 후에 erosion 연산을 수행하는 것이다. dilation 연산을 수행하면 각 화소의 밝기 값은 주위 화소들의 밝기 값 중 제일 큰 값으로 바뀌게 된다. 반대로 erosion 연산을 수행하면 각 화소의 밝기 값은 주위 화소들의 밝기 값 중 제일 작은 값으로 바뀌게 된다. 앞에서 기술한 closing 연산을 수행하면 균열은 사라지게 되고 배경에 해당하는 화상을 얻을 수 있기 때문에 빛에 의한 영향을 제거할 수 있는 것이다.

빛의 영향이 제거되면 다음으로 이진화 기법을 통해 균열을 추출한다. 역치값을 결정하는 방법은 크게 통계적 방

법과 수학적 모델에 의한 방법이 있다. 통계적 방법은 추출하고자 하는 물체의 화상을 미리 분석하여 역치값을 결정하는 것이다(Ito, et al., 2002; 鹿島建設技術研究所年報, 1995; Jitprasithsiri, et al., 1996). 그러나 이 방법은 많은 양의 화상 분석이 선행되어야 하기 때문에 범용성을 갖지 못한다. 이에 반해 수학적 모델에 의한 방법은 엔트로피, 모멘트, 판별함수 등과 같은 모델에 기반하여 역치값을 결정하기 때문에 보다 범용성을 갖는다(Seul, 2000). 일반적으로 많이 사용되는 방법은 최대 엔트로피 방법, 모멘트 보존 방법, Kittler 방법, Otsu 방법 등이 있다. 최대 엔트로피 방법에서는 엔트로피(데이터의 한 클래스를 표현하기 위해서 필요한 정보의 양)를 최대로 하는 값이 최적의 역치값으로 결정된다(Kapur, 1985). 모멘트 보존 방법은 결과로 하고자 하는 이진화된 화상이 원본 화상의 수학적 모멘트들을 가장 잘 보존하도록 하는 값이 최적의 역치값으로 결정된다(Tsai, 1985). 다음으로 Otsu방법은 판별함수 방법으로도 불리며, 밝기 등급 히스토그램의 0차, 1차 모멘트를 이용하여 배경과 물체 사이의 분산을 최대로 하는 값을 최적의 역치값으로 결정하는 것이다(Otsu, 1979). Otsu방법의 판별함수는 식 (1)과 같으며, 여기서 σ_T^2 는 역치값에 의존하지 않는 독립변수이기 때문에 결국 최적의 역치값은 σ_B^2 에 의해 결정된다.

$$\eta = \frac{(\sigma_B)^2}{(\sigma_T)^2} \tag{1}$$

여기서, η : 판별함수

σ_B^2 : 클래스들 사이의 분산

σ_T^2 : 클래스들 사이의 분산과 클래스 내의 분산의 합

σ_B^2 은 식 (2)와 같으며, 히스토그램의 0차, 1차 모멘트에 의해 클래스들 사이의 분산값이다. 따라서 이 값을 최대로 하는 값이 최적의 역치값으로 결정된다.

$$\sigma_B^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \tag{2}$$

여기서, ω_0 : 클래스 0의 히스토그램 0차 모멘트

ω_1 : 클래스 1의 히스토그램 0차 모멘트

μ_0 : 클래스 0의 히스토그램 1차 모멘트

μ_1 : 클래스 1의 히스토그램 1차 모멘트

콘크리트 표면 화상은 이진화 작업에 의해 흰색과 검은색으로 바뀌게 된다. 그러나 실제 콘크리트 표면에는 균열이

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 3 | 3 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 3 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

그림 4 labeling

외에도 작은 구멍, 얼룩 등과 같은 노이즈가 많기 때문에 이진화 작업만으로 균열을 검출하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 이런 노이즈와 균열을 분리할 수 있는 기법이 필요하다. 노이즈와 균열을 분리하기 위해 선행되어야 하는 것은 화상에 나타난 각각의 물체를 구분하는 것이다. 이런 기법을 Labeling이라 하며, 그림 4와 같이 각 물체의 영역에 따라 고유의 번호를 부여하는 것이다(Jain, 1989). Labeling이 수행된 화상내의 많은 물체로부터 원하는 물체를 추출해 내기 위해서는 물체의 특징을 나타낼 수 있는 기술자들이 필요하다. 많은 연구자들이 물체의 특징을 나타낼 수 있는 방법에 대해 연구를 수행하였는데, 형상계수를 이용한 방법이 간단하면서도 효과적인 것으로 보고되고 있다(Ammouche, 2000). 형상계수를 이용하여 균열을 분리할 수 있는 기법들은 다음과 같다.

Compactness는 식 (3)과 같이 최외각 둘레의 제곱을 물체의 면적으로 나눈 값이다. 이 값은 물체가 얼마나 원에 가까운가를 나타내며 원에 가까울수록 1에 가까운 값을 나타낸다. 그러나 perimeter가 작은 오차에 매우 민감하기 때문에 좋은 결과를 얻지 못하는 경우가 많다.

$$\text{Compactness} = \frac{\text{perimeter}^2}{4\pi \times \text{area}} \tag{3}$$

Elongation은 길이/폭 비로서 균열을 나타내는 좋은 형상계수이지만, 가지 형태로 뻗어 있는 균열에 대해서는 적용하기가 쉽지 않은 단점이 있다(Ammouche, 2000). 그러나 Packing density는 식 (4)와 같이 물체의 면적을 물체 외접원에 해당하는 면적으로 나눈 값으로서 이 형상계수는 가지형태의 균열을 추출하기가 용이할 뿐 아니라 오차에도 덜 민

감하기 때문에 다른 방법에 비해 좋은 결과를 얻을 수 있다. Ammouche 등(2000)은 마이크로 균열과 노이즈를 구분하기 위해 Packing density의 기준값을 0.2로 정하였고, Packing density가 0.2 이하인 것을 균열이라고 정하였다.

5. 균열 분석 알고리즘

균열 분석은 검출된 균열에 대해 폭, 길이, 방향, 분포 등을 파악하는 것이다. 균열의 폭, 길이, 방향을 구하기 위해 필요한 전처리 과정으로는 thinning 기법과 물체의 경계만을 남기는 기법이다. thinning 기법은 그림 5(b)와 같이 화상에서 3×3의 이웃 윈도우 안에서 조사하여 각 물체의 골격이 되는 중심 화소만 남을 때까지 경계를 한번에 한 화소 두께씩 벗겨내는 것이다(Haralick, 1992). 반면에 물체의 경계만을 남기는 기법은 그림 5(c)와 같이 화상에서 3×3의 이웃 윈도우 안에서 조사하여 물체의 최외각 화소만을 남겨두고 내부의 화소를 제거하는 것이다.

5.1 균열의 폭

콘크리트의 균열을 분석함에 있어서 가장 중요한 것은 균열의 폭을 구하는 것이다. 그 이유는 균열 폭의 크기에 따라 구조물의 내구성 및 안전성에 많은 영향을 미치기 때문이다. 따라서 많은 연구자들이 화상처리 기법에 기반한 균열 폭을 구하는 방법을 제시하였다. Doihara 등(1993)은 계층적

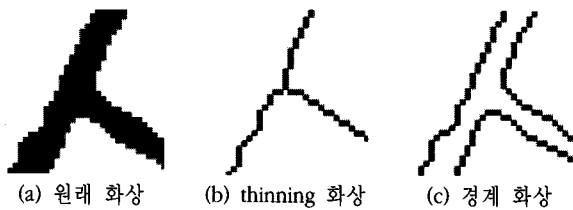


그림 5 균열의 thinning과 boundary

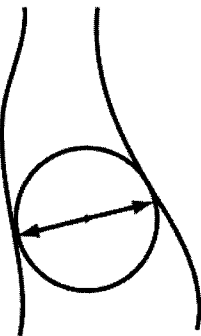


그림 6 내접원에 의한 균열 폭

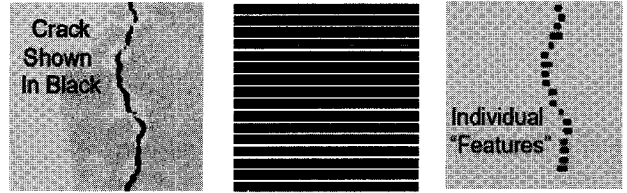


그림 7 grid mask에 의한 균열 폭 측정

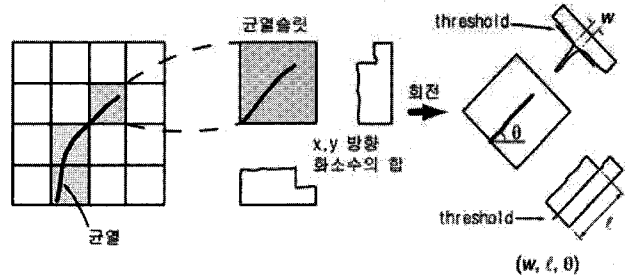


그림 8 가변슬릿법에 의한 균열 폭 측정

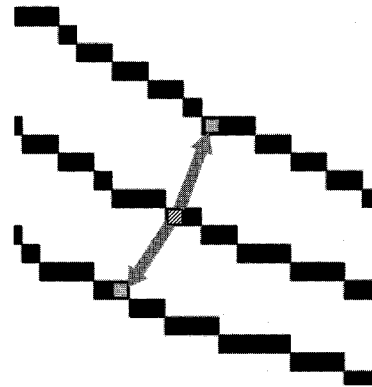


그림 9 균열의 중심 화소와 최외각 화소사이의 거리를 통한 균열 폭 측정

화상처리 기법에 기반하여 균열 폭을 구하였는데, 그림 6과 같이 내접원의 지름을 폭으로 정하였다. Qi 등(2003)은 그림 7에서와 같이 원래 균열 화상에서 grid mask라고 하는 일정 간격으로 격자가 그려진 화상을 빼 균열에 의해 없어진 격자의 길이를 통해 균열 폭을 구하였다. 일본의 코마츠 제작소와 코마츠 엔지니어링에서는 그림 8과 같이 가변슬릿법을 통해 균열의 폭을 구하였다. 그러나 이 방법은 역치값을 결정해 주어야 하는 단점이 있다. Li 등(1991) 다른 많은 연구자들은 균열의 길이에 따라 각 위치별로 균열 폭을 구하기보다 균열의 면적을 균열의 길이로 나누어 평균적인 의미의 균열 폭을 구하는 방법을 사용하고 있다. 이방연 등(2005)과 손홍규 등(2005)은 Doihara 등(1993)이 사용한 내접원의 개념에 기반하여 thinning과 물체의 경계만을 남기는 기법을 이용하여 thinning된 중심 화소로부터 양쪽 경계까지의 최소거리 합을 구함으로써 균열의 폭을 구하였다.

5.2 균열의 길이와 방향

일반적으로 균열의 길이를 구하는 방법은 *thinning* 기법을 이용하는데 균열의 중심 화소들의 거리 합을 통해 구한다. 이외에 Doihara 등(1993)은 계층적 화상처리 기법에 기반하여 상위 화상을 하위 화상에 투영시켜 하위 화상에 투영된 상위 화상의 좌표들 사이의 거리의 합을 통해 길이를 구하는 방법을 제시하였다. 일본의 코마츠 제작소와 코마츠 엔지니어링에서는 가변슬릿법을 이용하였는데 “5.1 균열의 폭”에서 기술한 바와 같이 역치값을 결정해 주어야 하는 단점이 있다. 이방연 등(2005)과 손흥규 등(2005)은 *thinning* 기법과 *labeling* 기법을 통해 각 균열의 시작점에서 끝점까지의 모든 픽셀의 거리를 더하여 길이를 구하였다. 균열의 방향은 균열이 일반적으로 한 방향으로 진전하지 않기 때문에 평균적인 값을 사용하여야 하는데 균열의 시작을 나타내는 화소와 균열을 나타내는 모든 화소들 사이의 좌표관계를 이용하여 평균을 내는 방법이 있고, 비교적 간단한 방법으로는 균열의 시작을 나타내는 화소의 좌표와 끝점을 나타내는 좌표만의 관계를 이용하여 각도를 구하는 방법이 있다.

5.3 균열 망

Saltikov와 Stroeven(1973)은 마이크로 균열의 분포 및 방향성을 정량화할 수 있는 기법으로서 *Oriented Secants Technique* 과 *Total Projection Technique* 등의 2가지 방법을 제시하였으며, 실험 결과 2가지 방법 모두 유사한 결과를 얻을 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Ringot, 1988). 다만, *Total Projection Technique*이 자동화가 가능하다는 장점이 있다.

*Total Projection Technique*의 기본 개념은 그림 10과 같으며 균열 화상을 회전하면서 균열을 회전각도에 직각방향으로 투영시켜 투영된 길이를 구하는 것이다. 그러나 이 길이는 동일한 균열에 대해 화상의 크기에 따라 변하기 때문에 식 (5)와 같이 면적을 나누어서 정규화한다. 투영된 길이를 회전각도에 따라 극좌표계로 나타내면 그림 11과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그래프에서 최대값을 가지는 회전각도는 균열 망의 전체적인 방향을 나타낸다.

$$L_A(\theta) = \frac{\text{투영된 길이}}{\text{화상의면적}} \quad (5)$$

균열의 방향성 및 등방성은 식 (6)을 통해 구할 수 있다. 이 값은 방향성이 없는 거북등과 같은 균열에 대하여는 0에 가까운 값을 나타내며, 방향성이 있는 균열에 대해서는 1에 가까운 값을 나타낸다.

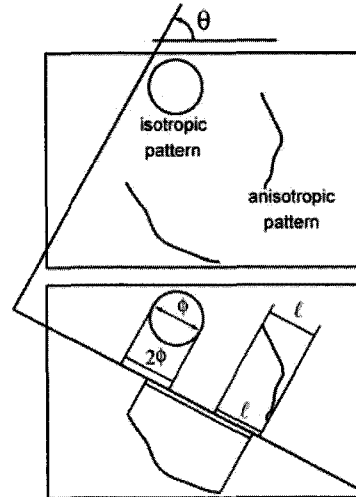


그림 10 Total Projection Technique

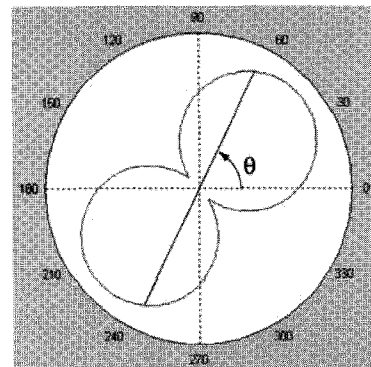


그림 11 회전각에 따른 균열의 투영된 길이 (극좌표)

$$\mu = \frac{L_{A\ or}}{L_{A\ tot}} = \frac{L_{A\ or}}{L_{A\ or} + L_{A\ is}} \quad (0 \leq \mu \leq 1) \quad (6)$$

여기서, $L_{A\ or}$: 전체 균열 망 중에서 이방성을 나타내는 정규화된 균열 길이

$$= L_{A\ tot} - L_{A\ is}$$

$L_{A\ is}$: 전체 균열 망 중에서 등방성을 나타내는 정규화된 균열 길이

$$= (\pi/2)L_{A\ min}$$

$L_{A\ tot}$: 정규화된 균열의 총 길이

6. 맺음말

본 기고에서는 콘크리트 구조물에 발생한 표면 균열을 효율적으로 계측하고 분석할 수 있는 방법 중의 하나인 디지털 화상처리 기법의 기본 원리 및 균열의 특징이 되는 폭, 길이, 방향 및 분포 특성 등을 파악할 수 있는 알고리즘

을 소개하였다. 디지털 화상처리 기법을 이용한 콘크리트 표면 균열 계측 기법은 자동화가 가능하기 때문에 기존 계측 방법의 문제점인 균열을 계측하는 동안 주위 환경에 따른 영향이나 계측자의 주관성이 개입될 여지가 없기 때문에 기존의 방법에 비하여 객관적이다. 물론 균열 검출을 위한 촬영 과정에서 초점이 맞지 않았거나 노이즈가 많은 경우 알고리즘이 달라져야 하거나 추가적인 작업이 필요할 경우도 있기 때문에, 아직까지 실제 구조물에 발생한 균열에 대하여 이 방법을 적용할 경우 컴퓨터와 작업자간의 피드백 과정이 필요하며 해상도(resolution) 이하의 균열에 대하여 정확성을 보장할 수 없는 문제점이 있다. 그러나 디지털 장비의 성능 및 디지털 화상처리 분야는 급격히 발전하고 있기 때문에 디지털 화상처리 기법을 이용한 균열 계측 분야는 지속적으로 발전하고 실무 적용성도 매우 높아질 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 이방연, 김윤용, 김진근, “개선된 이진화와 형상분석 기법을 응용한 콘크리트 표면 균열의 화상처리 알고리즘 개발”, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 17, No. 3, 2005, pp.361-368.
2. Ammouche, A., Breyse, D., Hornain, H., Didry, O., Marchand, J., “A New Image Analysis Technique for The Quantitative Assessment of Microcracks in Cement-Based Materials”, Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 1, 2000, pp.25-35.
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. Gonzalez, R. C., Wintz, P., “Digital Image Processing”, 2nd ed., Addison Wesley Longman, 1987.
5. Haralick, R.M, and Linda, G.S., “Computer and Robot Vision”, Vol.I, Addison-Wesley, 1992, pp.28~48.
6. Ito, A., Aoki, Y., Hashimoto, S., “Accurate Extraction and Measurement of Fine Cracks from Concrete Block Surface Image”, IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 3, 2002, pp.2202-2207.
7. Jain, A.K., “Fundamental of Digital Image Processing”, Prentice Hall, USA, 1989, pp.383
8. Jitprasithiri, S., Lee, H., Sorcic, R. G., and Johnston, R. “Development of Digital Image Processing Algorithm To Compute Unified Crack Index for Salt Lake City”, Transportation Research Record, Issue. 1526, 1996, pp.142-148.
9. Kapur, J. N., Sahoo, P. K., Wong, A. K. C., “A New Method for Gray Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram”, Comp. Vision Graph Image Process, Vol. 29, 1985, pp.273-289.
10. Kaseko, M. S., 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.
11. Li, L., Chan, P., and Lytton, R. L. “Detection of Thin Cracks on Noisy Pavement Images”, ASCE Transportation Research Record 1311. 1991, pp.131-135.
12. 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.
13. Qi, C., Weiss, J., Olek, J., “Characterization of Plastic Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Concrete Using image Analysis and a Modified Weibull Function”, Materials and Structures, Vol. 36, No. 26, 2003, pp.386-395.
14. Ringot, E., “Automatic Quantification of Microcracks Network by Stereological Method of Total Pojections in Mortars and Concretes”, Cement and Concrete Research, Vol. 18, 1988, pp.35-43.
15. Seul, M., O’Gorman, L., and Sammon, M. J., “Practical Algorithms for Image Analysis”, Cambridge University Press, 2000.
16. Stroeven, P., “Some Aspects of the Micromechanics of Concrete”, Ph. D. Thesis, University of Delft, 1973.
17. Stroeven, P., “Structural Investigation of Concrete by means of Stereological Technics”, RILEM SEMINAR PROCEEDINGS, Vol. 3, 1973, pp.52-69 & 173-185.
18. Tsai, W-H., “Moment-Preserving Thresholding: A New Approach”, Comp. Vision Graph Image Process, Vol. 29, 1985, pp.377-393.
19. William, K. P., “Digital Image Processing”, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc, 2002.
20. 鹿島建設技術研究所年報, “Study of a Method of Measuring Concrete Cracks Using Computer Image Processing”, 1995, pp.21-26. 