

[논문] - 비파괴검사학회지
*Journal of the Korean Society
 for Nondestructive Testing*
 Vol. 27, No. 2 (2007. 4)

콘크리트 구조물의 표면 균열 평가 기법

Surface Crack Evaluation Method in Concrete Structures

이방연*, 이성태**†, 김진근*

Bang Yeon Lee*, Seong-Tae Yi**† and Jin-Keun Kim*

초 록 콘크리트 구조물에 발생한 균열은 내구성과 사용성 측면의 문제가 발생할 수 있기 때문에 정기적으로 관리하여야 한다. 대부분의 균열 측정에는 균열 현미경과 균열 게이지와 같은 장비를 이용하여 균열의 폭, 길이, 방향 등과 같은 균열의 특징을 육안조사나 수작업에 의해 수행되고 있다. 그러나 기존의 방법들은 시간과 인력이 많이 필요할 뿐만 아니라 계측자의 주관이 개입될 여지가 많다. 따라서 이 연구에서는 이미지 프로세싱과 인공신경회로망을 이용하여 콘크리트 표면 균열 평가 기법을 제시하고자 한다. 개발된 기법은 세부분(균열 검출, 균열 분석, 균열 패턴인식)으로 나누어진다. 개발된 기법의 유효성을 검증하기 위하여 실험을 수행하였고, 실험 결과 개발된 기법은 콘크리트 표면 균열을 효과적으로 검출, 분석할 수 있었고, 5가지 균열 패턴을 정확히 인식하였다.

주요용어: 콘크리트 표면 균열, 이미지 프로세싱, 인공 신경 회로망, 균열 계측, 균열 패턴

Abstract Cracks in concrete structures should be measured to periodically assess potential problems in durability and serviceability. Conventional crack measurement systems depend on visual inspections and manual measurements of the crack features such as width, length, and direction using microscope and crack gage. However, conventional methods take long time as well as manpower, and lack quantitative objectivity resulted by inspectors. In this study, an evaluation technique for concrete surface cracks is developed using image processing and artificial neural network. Developed technique consists of three major parts: (1) crack detection (2) crack analysis and (3) pattern recognition. To examine validity of the technique developed in this study, crack analyzing tests were performed on the images obtained from various types of concrete surface cracks. The test results revealed that the system is highly effective in automatically analyzing concrete surface cracks in terms of features and patterns of cracks.

Keywords: Concrete Surface Crack, Image Processing, Artificial Neural Network, Crack Measurement, Crack Pattern

1. 서 론

현재 균열관리는 점검자의 육안조사나 균열 현미경과 같은 장비로 균열을 계측하고 기타 균열의 특징들을 직접 기록하는 방법에 의해 수행되고 있는데, 이러한 기존의 방법은 많은 시간과 인력이 요구되고 점검자의 주관에 개입되기 때문에 객관성이

부족할 뿐만 아니라 구조물에 접근이 불가능하여 측정이 곤란한 경우가 많다. 따라서 이러한 균열관리에 대한 문제점을 화상처리 기법을 통해 자동화, 정량화하려는 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다[1-7]. 화상처리 기법을 통한 균열관리 기술은 구조물에 발생한 균열을 정량적, 정성적으로 측정하여 이에 관한 정보를 디지털로 저장하여 추가

(접수일: 2007. 2. 28, 심사완료일: 2007. 3. 20) * 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, ** 충청대학 토목공학과, † Corresponding author: Department of Civil Engineering, Chung Cheong University, Cheongwon, Chungbuk 363-792, (E-mail: yist@ok.ac.kr)

적인 분석을 용이하게 함으로써 자동화할 수 있는 기술이다. 화상처리를 이용한 균열관리 기법은 크게 균열을 검출하는 기법과 검출된 균열을 분석하는 기법으로 구분할 수 있는데, 전자의 경우, 콘크리트 구조물에 발생하는 균열의 형상이 랜덤하여 수학적 모델링이 불가능할 뿐만 아니라 콘크리트 구조물은 시공 후 바로 외부 환경에 노출되기 때문에 콘크리트 표면에 균열 이외에 얼룩 등이 많이 발생되어 균열만 완벽히 검출할 수 있는 기법은 아직 소개되어 있지 않다[8]. 균열을 분석하는 기법은 검출된 균열의 특징인 폭, 길이, 방향, 분포특성 등을 정량적으로 파악하는 것이며, 다양한 기법들이 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다. 또한 균열의 발생 원인을 추정함에 있어서 균열의 패턴을 파악하는 것은 중요하다. 따라서 이 연구에서는 균열의 특성을 객관적으로 파악하면서 균열 검출 성능을 높일 수 있는 기법을 제안하였다. 또한 균열의 형태를 자동으로 인식할 수 있는 기법을 제안하였다.

2. 콘크리트 표면 균열 평가 기법

콘크리트 표면 균열 평가를 위하여 이 연구에서는 화상획득과 화소크기 보정, 균열 검출, 균열 분석, 균열 패턴 인식의 4가지로 나누어 개발하였다. 전체적인 알고리즘의 개념 및 흐름도는 Fig. 1과 같다.

2.1. 균열 검출

이 연구에서 균열 화상을 얻기 위해 사용한 CCD(charge coupled device) 카메라는 해상도 3008×1960 화소를 가진 Nikon사에서 제작한 D1X이며, CCD의 크기는 23.7×15.6 mm이다. 렌즈는 NIKKOR AF-S 28-70 mm를 사용하였으며, 촬영할 때 카메라와 콘크리트 면은 수직을 이루며, 렌즈에 의한 오차는 없다고 가정하였다. 화상처리 기법을 이용하여 균열의 폭, 길이 등을 계산할 때, 계산한 값이 의미를 갖기 위해서는 계산한 값들이 실제 균열의 것과 일치하여야 한다. 이를 위해서는 하나의 화소가 나타내는 실제 크기를 알아야 한다. 일반적으로 하나의 화소가 나타내는 실제 크기(α)는 식 (1)과 같이 촬영 길이를 CCD의 해상도로 나누어 구한다. 이 방법이 정확하지만 촬영면의 길이를 알아야 하는 단점이 있기 때문에 촬영하고자 하

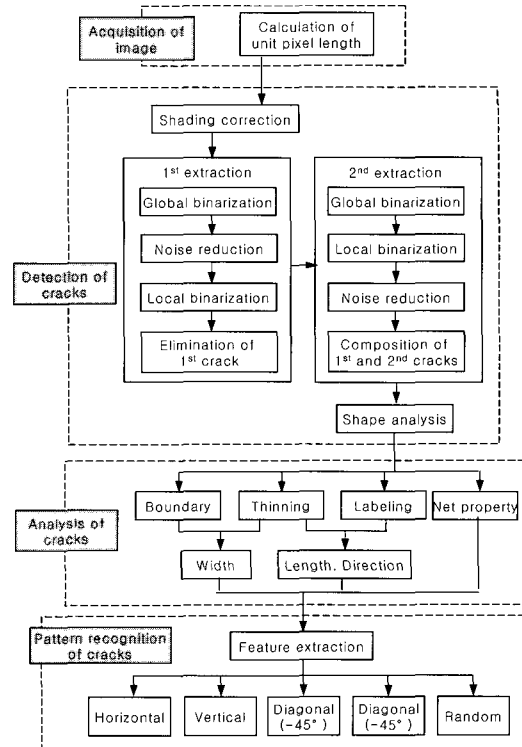


Fig. 1 Diagram of crack detection and analysis algorithm

는 대상물에 접근이 불가능할 경우 하나의 화소가 나타내는 실제 길이를 알 수 없다. 따라서 이 연구에서는 카메라와 콘크리트 면 사이의 거리를 통해 하나의 화소가 나타내는 실제 길이를 구할 수 있는 방법을 제시하였다.

$$\alpha = \frac{w_{real}}{R_{CCD}} \quad (1)$$

여기서, w_{real} 는 촬영 길이(mm)이고, R_{CCD} 는 CCD의 해상도이다. 카메라와 콘크리트 면 사이의 거리를 통해 하나의 화소가 나타내는 실제 길이를 구하는 방법의 기본 개념도는 Fig. 2와 같으며, 수식은 식 (2)와 같다.

$$\alpha = \frac{w_{real}}{R_{CCD}} = \frac{(\ell - \ell_{focus}) \times w_{CCD}}{\ell_{focus} \times R_{CCD}} \quad (2)$$

여기서, ℓ 은 CCD 면과 콘크리트 면 사이의 거리(mm), ℓ_{focus} 는 카메라의 초점 거리(mm), w_{CCD} 는 CCD의 폭(mm)이다. 초점거리와 해상도는 촬영

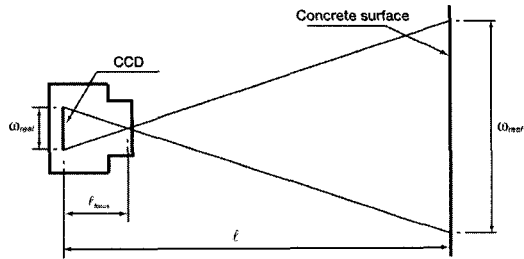


Fig. 2 Relation between size of CCD, region of concrete surface, focal length, and distance

시 화상데이터에 저장되고 CCD의 폭은 카메라의 모델에 따라 정해진 값이기 때문에 촬영시 추가로 계측하여야 하는 값은 CCD 면과 콘크리트 면 사이의 거리이다. 그러나 식 (2)를 바로 적용할 경우, Fig. 3과 4와 같이 CCD 면과 콘크리트 면 사이의 거리와 초점거리에 따라서 오차가 발생하기 때문에 이를 보정하기 위해 식 (2)를 수정해야 한다. 오차가 발생하는 원인은 카메라 내의 렌즈가 하나의 렌즈로 이루어진 단초점 렌즈가 아니라 여러개의 렌즈로 이루어진 렌즈군이기 때문에 정확한 초점거리를 찾기 어렵기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 이 논문에서 식 (3)과 같이 CCD 면과 콘크리트 면 사이의 거리와 초점 거리에 따른 영향을 보정할 수 있는 항을 추가하였으며, 보정항 내의 계수들은 실험을 통해 구하였다. Fig. 3과 4는 보정한 결과의 한 예로 보정항에 의해 기존의 방법에 의한 결과와 이 연구에서 제안한 방법에 의한 결과가 거의 유사함을 알 수 있다.

$$\alpha' = \frac{(\ell - \ell_{focus}) \times w_{CCD}}{\ell_{focus} \times R_{CCD}} \times \{0.47(\ell)^{0.058} (\ell_{focus})^{0.075}\} \quad (3)$$

화상에서 배경과 물체를 분리해 내는 가장 일반적인 방법은 이진화 기법이다. 이진화란 다양한 밝기값을 가진 화소들을 임의의 역치값을 기준으로 화소의 밝기값을 0(검은색)과 1(흰색)로 바꾸는 것이다. 이 연구에서는 다양한 이진화 기법 중에서 Otsu[9]가 제안한 판별함수기법을 기반으로 보다 정확히 배경으로부터 균열을 추출할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 빛의 영향이 제거된 화상은 Otsu 방법에 의해 1차적으로 배경과 물체로 바뀌게 된다. 그러나 Otsu 방법은 화상전체에 대한 밝

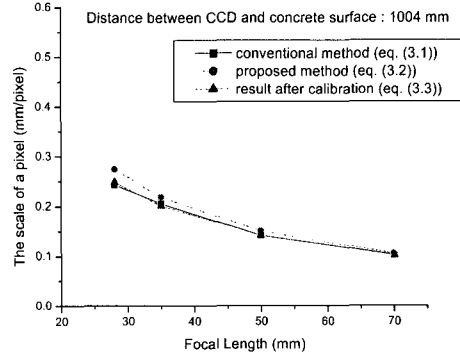


Fig. 3 Unit length according to focal length (ℓ : 1004 mm)

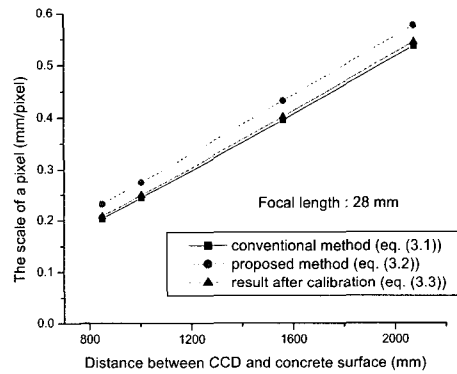
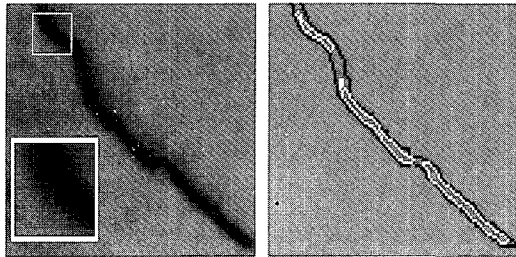


Fig. 4 Unit length according to ℓ (ℓ_{focus} : 28 mm)

기값을 가지고 역치값을 결정하기 때문에 보다 정확히 균열을 추출하기 위하여 전역적으로 추출된 균열의 경계에서 다시 지역적으로 이진화를 수행하였다. Fig. 5는 전역적 이진화만을 수행한 결과와 지역적 이진화까지 수행한 결과의 한 예를 보여준다. 지역적 이진화를 수행함으로써 균열이 더 정확히 추출됨을 확인할 수 있다. 그러나 지역적 이진화는 전역적 이진화를 통해 추출된 균열의 경계만을 따라서 이진화를 수행하기 때문에 균열의 밝기가 배경과 유사하여 전역적 이진화에서 추출되지 못한 균열이 있을 수 있다. Fig. 6은 이러한 하나의 예로써 A라고 표시된 균열이 1차에서 추출되지 못하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 이 연구에서는 1차에서 추출된 균열을 제외한 화상을 가지고 1차에서 추출되지 못한 균열을 추출할 수 있도록 2차 균열 추출을 추가하였다. 2차 균열 추출에서도 1차에서와 동일하게 Otsu 방법을 사용하는데 1차

에서 추출되지 못한 균열이 추출될 수 있는 이유는 2차 균열 추출에서는 1차에서 추출된 균열을 제외한 화상에서 추출이 이루어지기 때문이다.



(a) Local binarization (b) Result

Fig. 5 Local binarization and results

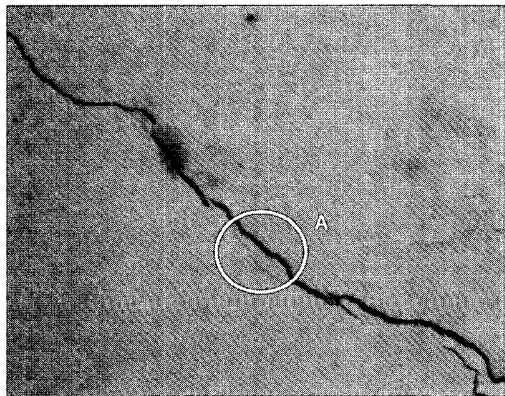
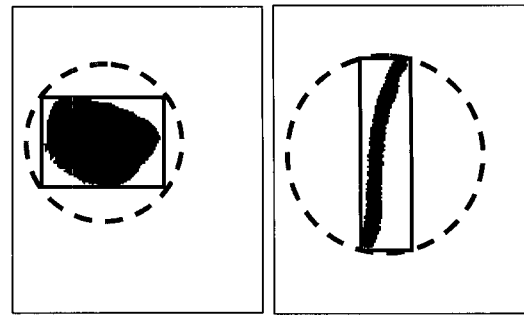


Fig. 6 Test results after 1st segmentation

Packing density의 정확한 의미는 물체의 면적을 물체의 외접원에 해당하는 면적으로 나눈 값이다. 그러나 물체의 정확한 외접원을 구하는 것은 프로그램으로 구현하기가 어려울 뿐더러 계산시간도 오래 걸리게 된다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 7과 같이 물체의 외접원을 직접 구하지 않고, 1차적으로 물체를 외접하는 직사각형을 구하여 직사각형의 외접원을 사용하였다. 이를 수식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

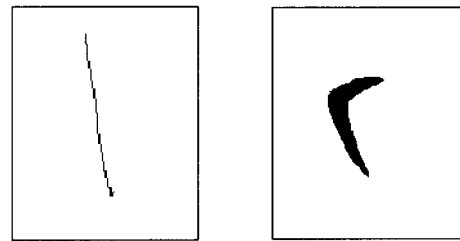
$$F_{cr} = \frac{A_{ob}}{A_{rcc}} \quad (4)$$

여기서, A_{ob} 는 물체의 면적이고, A_{rcc} 는 물체의 외접 직사각형의 외접원에 해당하는 면적이다. 형상계수는 물체의 고유한 특성을 나타내는 것이기 때문에 회전, 크기 등에 따라 변하지 않아야 한다.

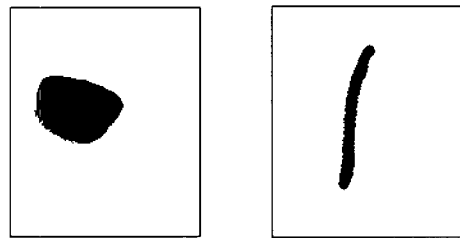


(a) (b)

Fig. 7 Modified packing density and circumscribed circle



(a) (b)



(c) (d)

Fig. 8 Several types of shape

이에 대한 검증을 하기 위하여 이 연구에서는 Fig. 8과 같은 다양한 형상에 대해 30°씩 회전하여 형상계수를 구하였다(Table 1). 실험 결과 Fig. 8(c)를 제외한 형상들의 경우, 거의 동일한 값이 나왔다. Fig. 8(c)의 형상계수 값이 각도에 따라 변한 이유는 형상이 직사각형에 가까울 경우, 회전 각도에 따라서 외접 직사각형의 크기가 달라지기 때문이다. 그러나 Table 1의 결과를 보면 균열과 형상이 유사한 Fig. 8(a), (b), (d)의 형상계수가 Fig. 8(c)의 형상계수 값과 확연히 구분되는 것을 확인할 수 있다. 이 연구에서는 수정된 packing density를 이용하여 실제 균열에 대한 시험을 통해 균열을 다른 형상의 물체로부터 구분할 수 있는 기준값을 0.12로 정하였다.

Table 1 Packing density with rotation each shape (F_{cr})

Rotation angle	a	b	c	d
0	0.014	0.169	0.443	0.096
30	0.014	0.151	0.484	0.096
60	0.014	0.164	0.417	0.094
90	0.014	0.169	0.443	0.096
120	0.014	0.151	0.484	0.096
150	0.014	0.164	0.417	0.094
180	0.014	0.169	0.443	0.096
평균	0.014	0.162	0.447	0.095

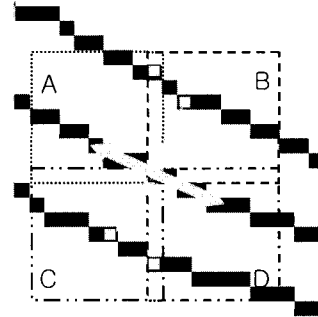


Fig. 10 Diagram of algorithm for crack width

2.2. 균열 분석

이 연구에서 제시한 균열의 폭을 구하는 알고리즘의 개요도는 Fig. 9와 같다. 세션화(thinning)와 경계화(boundary)의 전처리 과정이 수행된 화상은 Fig. 10과 같이 경계와 중심 화소만 남게 된다. 균열의 폭은 중심 화소로부터 양쪽 경계까지 가장 짧은 거리로 정의되며, 전처리 과정이 끝난 화상에 Fig. 11과 같은 각각의 거리 필터를 중심 화소로부터 A, B, C, D 영역(40×40 화소)에 적용하여 경계 화소들 중 거리가 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.

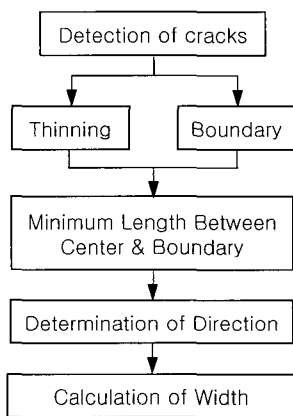


Fig. 9 Flow chart of algorithm for crack width

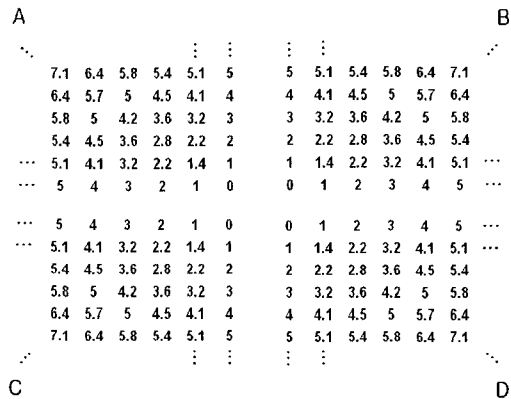
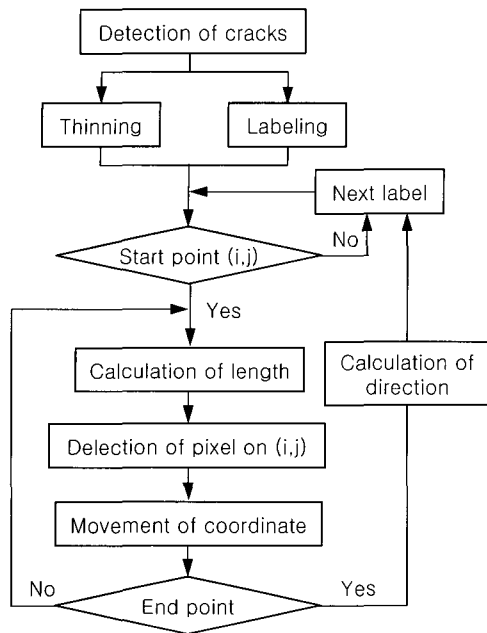


Fig. 11 Distance filter for crack width

균열의 길이와 방향을 구하는 알고리즘의 개요도는 Fig. 12와 같다. 전처리 과정으로 thinning과 labeling 과정이 수행된 화상은 각 균열 별로 고유 번호가 부여된 한 화소의 두께를 가진 화상으로 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 (5)와 같이 계산된다.

$$\angle(i) = \frac{180}{\pi} \times \tan^{-1} \left\{ \frac{y'(i) - y(i)}{x'(i) - x(i)} \right\} \quad (5)$$



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

Fig. 12 Flow chart of crack length and direction algorithm

2.3. 균열 패턴인식

이 연구에서는 균열의 패턴을 횡방향 균열, 종방향 균열, 대각선(-45°) 균열, 대각선(+45°) 균열, 비방향성 균열로 정하였으며 이러한 균열의 패턴을 분류하기 위해서 total projection technique을 사용하였다[10,11]. 패턴 인자는 total projection technique에 의해 각 회전 각도에 따른 투영된 길이 값이 되며, 화상의 크기나 균열의 크기에 관계 없이 패턴을 분류하기 위해서 모든 값들을 투영된 길이 중에서 제일 큰 값으로 나누어 0부터 1까지의 값을 갖도록 정규화하였다. total projection technique에 의한 회전각도에 따른 투영된 길이 값들은 회전각도의 간격에 따라서 그 개수가 정해지는데 이 연구에서는 1° 간격으로 회전시켜 얻은 180개의 값들 중에서 3개씩 평균하여 구한 값을 최종적으로 신경회로망의 입력층에 넣을 패턴 인자로 정하였다. 따라서 이 연구에서 사용한 신경회로망의 입력층의 노드 개수는 60개이다. 이 연구에서는 입력층 60, 은닉층 4, 출력층 5개의 구조를 가지며 은닉층과 출력층의 활성화함수는 hyperbolic tangent sigmoid인 MLP를 구성하였다. 입력층의 각 노드에

는 패턴 인자가 입력되도록 하였으며, 출력층의 각 노드에는 0부터 1사이의 값을 갖도록 하였다. 또한 가중치(w), 임계값(b)은 횡방향, 종방향, 대각선(-45°), 대각선(+45°) 균열에 대해서는 각각 100개, 방향성이 없는 균열에 대해서는 80개의 가상 균열 화상을 사용하여 학습을 통해 결정하였다. Table 2는 목표 출력값이다. 학습방법은 과적합(overfitting) 문제를 피하기 위해 Bayesian regularization 방법을 사용하였다[12,13]. 최종적인 인식은 Table 3과 같이 신경회로망의 연산에 의해 출력된 결과층의 노드 값 중에서 제일 큰 수의 노드를 선택하여 패턴을 인식하도록 하였다.

Table 2 Desired outputs for learning

	Horizontal	Vertical	Diagonal (-45°)	Diagonal (+45°)	Random
node 1	1	0	0	0	0
node 2	0	1	0	0	0
node 3	0	0	1	0	0
node 4	0	0	0	1	0
node 5	0	0	0	0	1

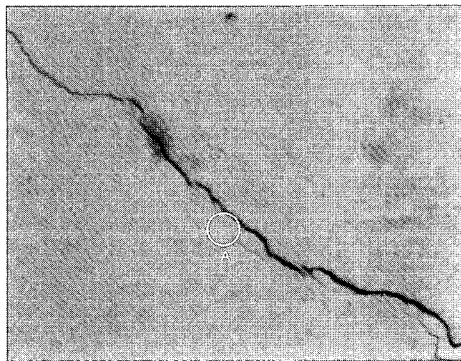
Table 3 Results of recognition

Node number corresponding to the maximum output value	Result of recognition
1	Horizontal
2	Vertical
3	Diagonal (-45°)
4	Diagonal (+45°)
5	Random

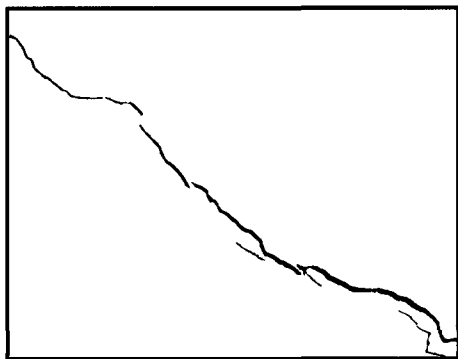
3. 성능평가 및 고찰

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 28 mm ~ 70 mm 렌즈가 부착된 N사의 D1X 모델이다. Fig. 13부터 Fig. 15까지는 검출 결과를 나타낸 것이다. Fig. 13(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. 형상계수의 기준을 0.12보다 더 크게 하여 검출되지 못한 미세균열을 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. 14는 이 연구에서 제시한 균열 검출 알고리즘이 다른 노이즈(타설할 때 기포로 인하여 발생한 표면의 작은 구멍과 이물질들)로부터 균열만을 검출하는데 효과적임을 보여주고 있으며, Fig. 15에서 나타나는 것과 같이 가지 형태로 뻗어 나온 균열에 대해서도 효과적임을 알 수 있다.

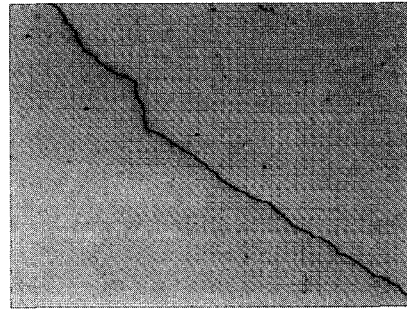


(a) Test image

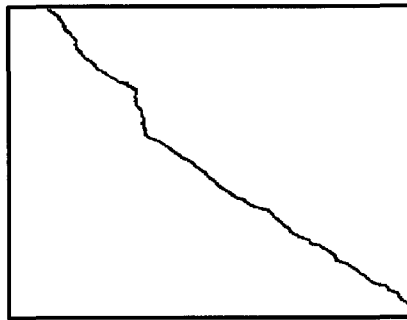


(b) Test result

Fig. 13 Test results of crack detection for specimen 1

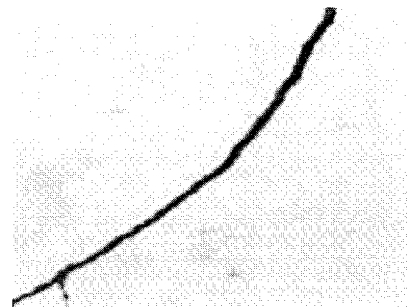


(a) Test image

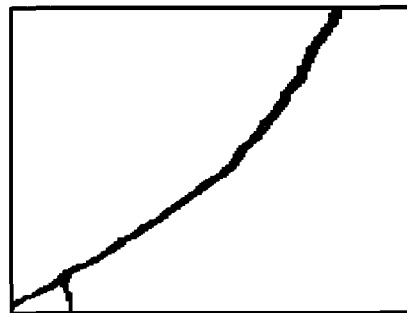


(b) Test result

Fig. 14 Test results of crack detection for specimen 2



(a) Test image



(b) Test result

Fig. 15 Test results of crack detection for specimen 3

균열 분석 알고리즘은 Fig. 16의 두가지 화상에 대해 검증하였으며, 이 연구에서 제시한 알고리즘으로 분석한 값을 균열 현미경을 이용하여 계측한 값과 비교하였다(Table 4). Fig. 17은 균열 현미경을 이용하여 계측한 부분을 확대하여 화상처리 결과 균열의 경계로 표시된 부분을 원 화상에 겹쳐 표시한 것이다. Fig. 16(c)의 경우 실제 균열이 아니지만 균열로 검출된 이유는 이 연구에서 색(칼라)에 대한 고려를 하지 않았기 때문이며, 추후 색에 대한 고려도 추가할 예정이다. Table 4를 보면 균열 현미경으로 계측한 값보다 화상처리 기법으로 계측한 값이 더 정밀한데 그 이유는 균열 현미경을 이용하여 계측한 값의 경우, 균열 현미경을 통해 0.1 mm 단위까지만 확인할 수 있었던 반면, 디지털 카메라

로 촬영한 화상의 해상도는 두 화상 각각에 대해 0.04536 mm/pixel, 0.04176 mm/pixel로 해상도가 더 높았기 때문이다. 본 실험을 통해 이 연구에서 제시한 균열 검출 및 분석 알고리즘의 실효성을 검증하였다.

균열 패턴인식 알고리즘은 총 38개의 균열 화상(횡방향 균열: 4개, 종방향 균열: 19개, 대각선(-45°) 균열: 7개, 대각선(+45°) 균열: 5개, 비방향성 균열: 3개)을 사용하여 검증하였다. Table 5는 최종 인식결과이며, 비방향성 균열의 경우 검출 결과에 다소 오차가 있음에도 불구하고 시험에 사용한 모든 경우에 대하여 사람의 인식 결과와 100% 일치하였다.

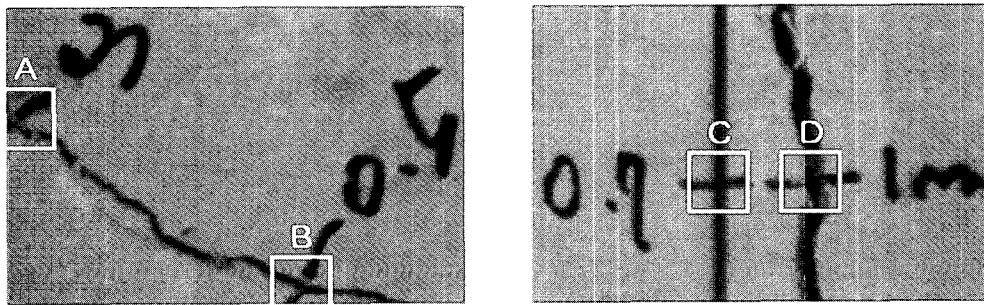


Fig. 16 Test image

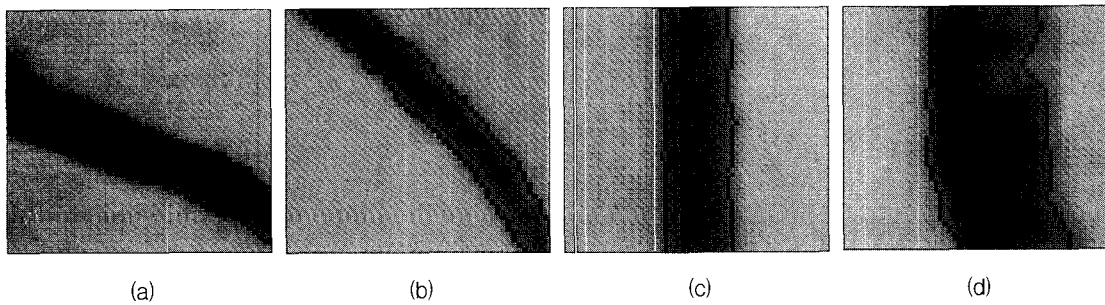


Fig. 17 Magnified image

Table 4 Test results for crack width

Unit pixel length	Measurement	Width by crack microscope (mm)	Width by proposed algorithm (mm)
0.04536 (mm/화소)	A	0.3	0.33
	B	0.5	0.51
0.04176 (mm/화소)	C	0.7	0.69
	D	1	0.98

Table 5 Results of pattern recognition of cracks by artificial neural network

Classifications by human	Classifications by artificial neural network						Accuracy (%)
	Horizontal	Vertical	Diagonal (-45°)	Diagonal (+45°)	Random	Total	
Horizontal	4	0	0	0	0	4	100
Vertical	0	19	0	0	0	19	100
Diagonal(-45°)	0	0	7	0	0	7	100
Diagonal(+45°)	0	0	0	5	0	5	100
Random	0	0	0	0	3	3	100

4. 결 론

이 연구에서는 CCD 카메라를 통해 콘크리트 균열 화상을 얻고 이를 컴퓨터로 분석할 수 있는 시스템을 구축하고자 하였으며, 균열의 폭, 길이, 그리고 방향을 정량적으로 측정하는 기법과 균열의 패턴을 정성적으로 인식할 수 있는 기법을 제시하였으며, 이 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 구조물에 접근이 어려운 경우에도 보다 쉽게 균열 계측 및 분석이 가능하도록 하기 위하여 화상 획득과정에서 하나의 화소가 나타내는 실제 길이를 CCD 카메라와 콘크리트 면 사이의 거리만을 측정함으로써 구할 수 있도록 하였다.
- 2) 기존 연구내용을 바탕으로 배경, 노이즈, 균열이 함께 있는 화상에서 균열 검출 성능을 향상시키기 위하여 이진화 기법과 형상 분석 기법을 응용하여 기존 검출 시스템에서는 검출하기 어려웠던 미세 균열까지 검출할 수 있는 기법을 제시하였다.
- 3) 검출된 균열을 바탕으로 균열의 폭, 길이, 그리고 방향을 정량적으로 측정할 수 있는 알고리즘을 제시하였고, 균열 현미경 등의 장비로 측정된 값과 비교함으로써 이 연구에서 제시한 알고리즘이 균열의 특징들을 정량적으로 계측할 수 있음을 확인하였다.
- 4) 균열의 패턴을 5가지(횡방향, 종방향, 대각선(-45°), 대각선(+45°), 비방향성)로 나누어 신경회로망을 이용하여 균열의 패턴을 자동으로 인식할 수 있는 기법을 제시하였으며, 시험에 사용된 균열의 패턴을 100% 인식하였다.

참고문헌

- [1] G. D. Schutter, "Advanced monitoring of cracked structures using video microscope and automated image analysis," NDT & E International : Independent Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 35, No. 4, pp. 209-212, (2002)
- [2] B. G. Batchelor and S. M. Cotter, "Detection of cracks using image processing algorithms implemented in hardware," (from Image and Vision Computing 1983) SPIE Milestone Series MS, Vol. 97, pp. 413-421, (1994)
- [3] T. Doihara, K. Hirono and K. Oda, "Crack measuring system based on hierarchical image processing technique," International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, No. 5, pp. 155-159, (1993)
- [4] A. Ito, Y. Aoki and S. Hashimoto, "Accurate extraction and measurement of fine cracks from concrete block surface image," IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 3, pp. 2202-2207, (2002)
- [5] P. C. Tung, Y. R. Hwang and M. C. Wu, "The development of a mobile manipulator imaging system for bridge crack inspection," Automation in Construction, Vol. 11, No. 6, pp. 717-729, (2002)
- [6] Z. Liu, S. A. Suandi, T. Ohashi and T. Ejima, "A tunnel crack detection and classification systems based on image processing," Proceedings of SPIE-The

- International Society for Optical Engineering, No. 4664, pp. 145-152, (2002)
- [7] 鹿島建設技術研究所年報, "Study of a method of measuring concrete cracks using computer image processing," pp. 21-26, (1995)
- [8] A. Ammouche, J. Riss, D. Breyse, and J. Marchand, "Image analysis for the automated study of microracks in concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, pp. 267-278, (2001)
- [9] 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)
- [10] P. Stroeven, "Some aspects of the micromechanics of concrete," Ph. D. Thesis, University of Delft, (1973)
- [11] P. Stroeven, "Structural investigation of concrete by means of stereological technics," *Rilem Seminar Proceedings*, Vol. 3, pp. 52-69 & 173-185, (1973)
- [12] D. J. C. MacKay, "Bayesian interpolation," *neural computation*, Vol. 4, No. 3, pp. 415-447, (1992)
- [13] F. D. Foresee, and M. T. Hagan, "Gauss-Newton approximation to bayesian regularization," *Proceedings of the 1997 International Joint Conference on Neural Networks*, pp. 1930-1935, (1997)