

콘크리트 터널 라이닝 균열검사 시스템 개발에 관한 연구

Development of Inspection System for Crack on the Lining of Concrete Tunnel

고 봉 수, 손 영 갑, 신 동 익, 김 병 화, 한 창 수*
(Bongsoo Ko, Youngkap Son, Dongik Shin, Byunghwa Kim, and Changsoo Han)

Abstract : To assess tunnel safety, cracks in tunnel lining are measured by inspectors, who observe cracks with their naked eyes and record them. But manual inspection is slow, and measured crack data is subjective. Therefore, this study proposes inspection system for measuring cracks in tunnel lining and providing objective crack data to be used in safety assessment. The system consists of On-Vehicle system and Laboratory system. On-Vehicle system acquires image data with line CCD camera on scanning along the tunnel lining. Laboratory system extracts crack information from the acquired image using image processing. Measured crack information is crack thickness, length and orientation. To improve accuracy of crack recognition, the geometric properties and patterns of cracks in concrete structure were applied to image processing. The proposed system was verified with experiments in both laboratory environment and field environment such as subway tunnel.

Keywords : cracks in tunnel, image acquisition, image processing, inspection system, line CCD camera, manual inspection, tunnel assessment, tunnel lining, tunnel safety, crack measurement.

I. 서론

지금까지 지하철, 철도, 고속도로 및 도로 등에 많은 콘크리트 터널이 건설되었고 이러한 콘크리트 구조물들은 항상 그 안전문제가 대두되고 있다. 대형 구조물의 안전성을 확보하기 위하여 주기적으로 안전검사가 실행되고 있으며 이러한 안전검사를 위한 비파괴검사 기술은 이미 많은 성과를 거두었다. 하지만 비파괴검사 기술은 대부분 정밀 안전 검사에 응용되고 있을 뿐 검사의 복잡성, 느린 검사속도 등으로 인해 초기 육안검사를 대체하지는 못하고 있다[1].

해외에서는 이러한 문제점을 인식하여, 도로표면, 교각, 터널 라이닝과 같은 대형 구조물의 초기 육안 균열검사를 자동화할 수 있는 시스템을 개발하는데 많은 노력을 기울이고 있으며 영상획득 시스템을 이용한 검사 장치는 이미 외국의 몇몇 업체에 의해 상용화되고 있다.

일본의 고마츠(Komatsu)사는 자체적으로 개발한 레이저 발진부와 수신부를 차량에 탑재하여 도로의 표면 및 터널 라이닝의 영상을 획득하는 시스템을 개발하였고 이를 상용화 하였다[2]. 일본철도종합연구소(Railroad Technical Research Institute)에서는 라인-스캔 카메라를 이용하여 철도 터널표면 영상을 획득하는 시스템을 개발하였다[3]. 캐나다 로드웨어(Roadware)사는 도로 표면의 상태를 검사하기 위한 시스템을 개발하여 상용화 하였다. 이 시스템은 CCD카메라, 자이로, 초음파 센서를 차량에 탑재하여 도로 표면의 영상을 80km/h의 속도로 3-4cm의 분해능을 갖도록 획득한다[4].

이들 시스템은 획득한 영상을 이용하여 구조물의 오염, 박

리, 박태등 여러 환경에 대한 정보를 획득하는데 유용하게 사용되고 있다. 하지만 영상 획득단계에만 머무르고 있으며, 균열을 추출 및 측정할 수 있는 알고리즘은 아직 연구 단계에 있다. 따라서 검사 속도의 증가 및 검사의 객관성을 확보하기 위하여 획득된 영상을 이용하여 균열을 추출하고 측정할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다.

일반적으로 구조물의 표면 상태를 검사하기 위해서는 표면을 영상화하는 방법이 많이 쓰이고 있으며 표면을 영상화하는 방법은 레이저를 이용하는 방법과 카메라를 이용하는 방법이 있다. 레이저의 경우는 국외 균열검사 시스템에서 많이 적용하고 있지만 가격이 수 억원에 이르고 있으며, 레이저를 이용할 경우 레이저 특성이 영상의 품질을 좌우하기 때문에 장기 사용에 의한 레이저 열화에 따른 교체 문제와 고발열 레이저 냉각 시스템 비용등은 균열인식 시스템의 운전비용 및 유지관리에 큰 부담을 줄 수 있다. 따라서 저가의 시스템 개발을 위해서는 카메라를 이용하여 구조물의 표면을 영상화하고 획득된 영상으로부터 구조물의 상태를 판단할 수 있는 균열 데이터 획득에 관한 연구가 절실히 요구된다.

따라서 본 논문은 터널 라이닝부 내벽 표면을 영상화할 수 있는 영상획득장치를 개발하고 획득된 영상으로부터 균열을 인식하여 균열에 관한 정보를 추출하는 알고리즘을 연구하였다. 또한 연구된 검사 시스템의 검증을 위하여 실내 및 실외 현장에서 실험 평가를 수행하였고 현장 적용 가능성을 확인하였다.

II. 균열검사 시스템

1. 검사대상

콘크리트 터널 내부의 외관조사는 라이닝균열, 표면부식, 누수, 백화, 박리조사등이 있다. 외관조사 중 특히 콘크리트의 균열에 대한 조사는 구조물 내부와 외부의 상태를 평가하고 국부적인 정밀 안전진단 수행항목, 절차 및 방법등을 결정하는데 있어서 매우 중요한 요소로 작용한다[5].

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 3. 10., 채택확정 : 2003. 9. 3.

고봉수, 손영갑 : 한양대학교 대학원

(bongsoo95@ihanyang.ac.kr/sonyg@hanmail.net)

신동익 : (주) 삼성테크윈(dongik.shin@samsung.com)

김병화 : 한국건설기술연구원(bhkim@kict.re.kr)

한창수 : 한양대학교 기계정보경영(cshan@hanyang.ac.kr)

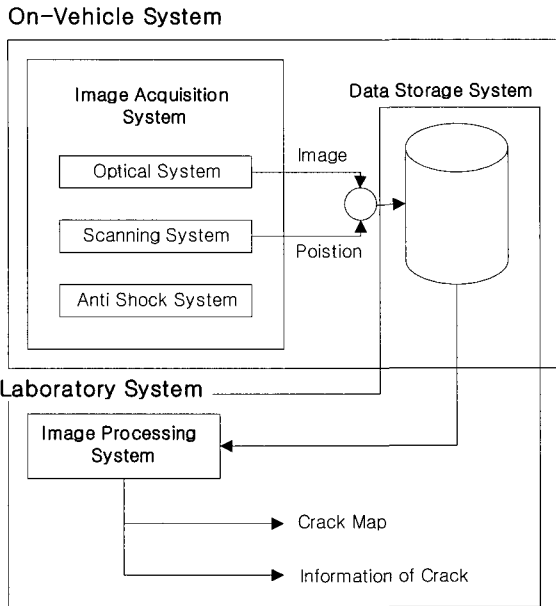


그림 1. 균열검사 시스템 구성도.
Fig. 1. Schematic diagram of crack inspection system.

균열의 발생은 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하며 주로 콘크리트 양생기간의 부족, 콘크리트 양생기간 중 온도강하에 따른 수축, 주변 대기 온도 변화에 따른 수축과 팽창의 반복, 슬럼프(slump)가 큰 콘크리트의 타설, 국부적인 지반 팽창에 따른 추가 하중의 증가, 라이닝과 원 지반 사이의 공극에 의한 휨 모멘트 혹은 편압의 발생, 측벽 하부기초의 침하 등이 있는 것으로 알려져 있다.

최근 국내터널에서 시행된 콘크리트 라이닝에 발생한 균열을 조사 분석한 결과에 의하면 균열의 형태는 종방향균열, 횡방향균열, 전단균열, 복합균열로 크게 구분된다. 종방향균열은 터널 중심선과 평행하게 터널 천단과 어깨부에 터널 종단 방향으로 발생한 직선상의 균열 형태이며, 횡방향균열은 터널 중심선에 직교하여 횡방향으로 발생하는 균열형태이고, 전단균열은 터널 중심선에 대각선 방향으로 나타나는 균열이며, 복합균열은 터널 천단에서 발생한 종방향균열이 전단균열의 형태로 진전되거나 종방향 균열이 횡방향 균열과 복합적으로 나타나는 균열이다.

상기 균열중 약 54%이상이 종방향 균열이며 횡방향 균열이 약 27%정도를 차지한다[6]. 따라서 본 연구에서는 종방향 균열, 횡방향균열, 전단균열 검사를 목표로 삼고 있다.

2. 시스템 구성

콘크리트 터널 라이닝 균열검사 시스템은 그림 1과 같이 차량 시스템과 해석 시스템으로 구별된다. 차량 시스템은 터널 라이닝부와 평행한 방향으로 이동하면서 잡음을 최소화하고 균열과 비균열의 대비를 최대화시키면서 터널 라이닝부의 영상을 획득할 수 있는 광학장치 및 기계적 요소와 획득된 영상을 저장하는 장치로 구성되어 있으며 해석 시스템은 저장된 영상 데이터를 이용하여 균열을 추출하고 추출된 균열의 특징 데이터를 시각화 및 수치화 하는 소프트웨어로 구성된다. 소프트웨어 알고리즘은 2장 3절에서 다루기로 한다.

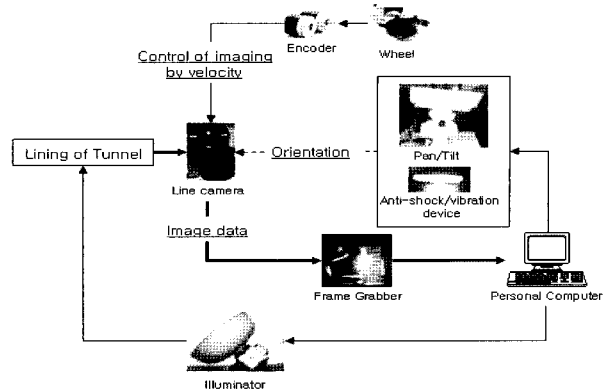


그림 2. 차량시스템.
Fig. 2. On-Vehicle system.

표 1. 카메라 사양.

Table 1. Specification of the camera.

| Elements | Specification |
|----------------|---------------|
| Density | 4096 pixels |
| Max. Line rate | 23KHz |
| Interface | LVDS |

차량 시스템은 그림 2와 같이 영상을 획득할 수 있는 CCD 카메라와 프레임 그래버, 카메라의 FOV를 제어하기 위한 장치, 충격 및 진동 방지를 위한 장치, 조명장치, 이동 속도를 측정할 수 있는 엔코더와 각 장치를 제어하기 위한 컴퓨터로 구성되어 있다.

CCD카메라는 감광소자의 배열 형태에 따라 매트릭스(matrix) 카메라와 라인스캔(linescan)카메라로 구분된다. 매트릭스 카메라는 한번의 노출로 일정 면적의 영상을 형성하기 때문에 사람의 눈과 친숙하고 인터페이스가 이미 표준화 되어있는 장점이 있지만 소자의 밀도가 비교적 낮은 단점이 있다. 반면에 라인스캔 카메라의 경우는 CCD소자의 배열이 매트릭스 카메라와 달리 일정한 면적을 형성하지 않고 하나의 열로 배열되어 있어 카메라 혹은 대상물체가 이동을 하면서 촬영을 하게 되어 촬영에 어려움이 다소 있지만 소자의 밀도가 높아 한번에 많은 영역의 영상을 획득할 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 고밀도(4096 pixel)라인스캔 카메라를 영상획득센서로 선정하였다. 표 1에서 카메라의 사양을 나타내고 있다.

이동체 위에 카메라를 탑재하고 이동하면서 검사 대상체 표면을 영상화할 때 이동속도가 일정하지 않으면 동일한 크기의 물체가 속도 변화에 따라 영상 내에서 크기가 변화한다. 이러한 크기의 변화는 영상화된 데이터를 처리하여 균열 정보를 추출할 때 오차를 유발하는 요인이 된다. 따라서 이동체의 속도가 변화할 경우 속도와 관계없이 일정한 간격으로 영상화할 수 있는 방법을 적용하여야 한다.

카메라의 영상화 속도 조절은 이동체의 속도 변화를 계측하여 이를 트리거(trigger)신호로써 카메라에 피드백하여 조절한다. 이동속도의 계측은 일반적으로 타코메타를 사용하지만 라인스캔 카메라의 영상화 속도조절은 TTL레벨의 펄스 신호를 이용하므로 속도 계측은 엔코더를 이용하였다.

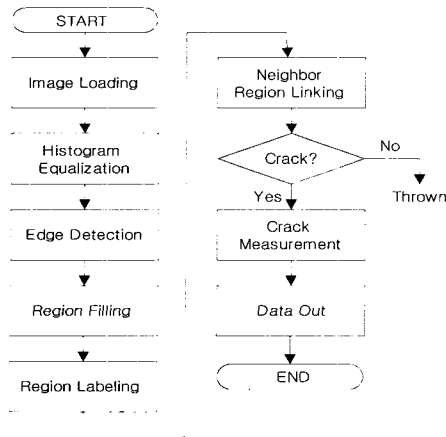


그림 3. 균열 추출 및 측정 알고리즘.
Fig. 3. Crack detection and measurement algorithm.

라인스캔 카메라는 일반적인 CCD 카메라에 비해 유효민감도(sensitivity)가 떨어지기 때문에 더 많은 광량을 요구한다. 조명 시스템이 가져야하는 또 다른 특성은 시간에 따라 조사 분포가 변하지 않는 안정성이다. 본 연구에서는 할로겐 광원을 이용한 최대 1000W의 출력을 낼 수 있는 조명을 선정하였다. 그리고 조사 효율을 높이기 위한 반사경(reflection mirror)과 넓은 범위에 조사할 수 있도록 확산렌즈(scattering lens)를 설계하였다.

영상의 획득은 실내의 평탄한 바닥에서 이루어지는 것이 아니라 현장에서 이루어진다. 따라서 바닥면의 불균일로 인한 진동은 영상의 초점을 흐리게 만들어 균열 추출이 어려워진다. 따라서 진동을 저감시키기 위하여 방진 캐스터 및 와이어로프를 이용하여 방진 장치를 설계하였다.

3. 균열 추출 및 측정 알고리즘

시각으로 균열을 인식하는데 있어서 사용되는 정보는 대상에서 반사되는 빛의 양이다. 균열은 표면이 갈라진 부분이며 표면에 비하여 빛을 적게 반사시킨다. 따라서 시각은 표면과 균열 부위의 빛 반사의 대비를 이용하여 균열을 구분할 수 있다. 해석 시스템은 이러한 반사 특성을 이용하여 획득된 영상에서 균열을 추출(crack detection)하고 균열을 측정(crack measurement)하는 알고리즘으로 구성되며 그림 3과 같이 균열 추출 및 측정 알고리즘을 개발하였다. 현재까지 영상처리를 이용한 자동화는 매우 간단한 응용에 그치고 있으며 환경을 예측하기 힘든 상황에서 완전 자동화를 구현하기란 어려운 점이 많다. 이 연구에서는 균열을 완전 자동으로 인식하는 것을 목표로 하지만 실제 상황에서는 실패할 경우가 많다. 예를 들면 인식하지 못한 균열이 있을 수도 있고 균열로 잘못 인식된 영역도 있을 수 있다. 이러한 경우 사용자의 간섭으로 균열을 인식 및 제거할 수 있는 알고리즘도 필요하다. 따라서 그래프탐색(graph search)방법을 이용하여 사용자가 제공한 균열상의 두 점을 통하여 세부 균열을 추출하는 반자동 알고리즘도 구현하였다.

3.1 자동 균열 추출

균열 추출이란 전체 영상과 균열이라고 판단되는 부분을 분리하는 것으로 영상분할(image segmentation)이라고 부른다.

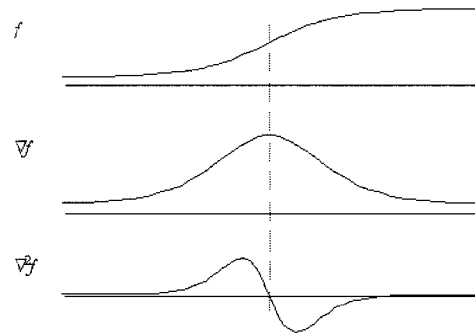


그림 4. 미분부호가 바뀌는 지점의 1차원 형상.
Fig. 4. 1-D edge profile of the zero-crossing.

영상에서 균열과 비 균열은 각각의 명암정보의 차이를 이용하고 있으며 이는 영상의 대비가 클수록 명암 정보의 차이가 커지며 조명의 차이가 다소 있어도 강인하게 균열과 비 균열을 구별할 수 있다. 히스토그램 평준화(histogram equalization)는 영상의 대비를 높이는 방법으로 다음과 같이 표현된다.

$$s_k = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \quad k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (1)$$

여기서 s_k 는 새로 구해진 정규화된(Normalized) 명암값이며 n 은 전체 픽셀의 개수, n_j 는 명암값이 j 인 픽셀의 개수, k 는 입력된 픽셀의 명암값, L 은 최대 명암값이다

균열 추출을 위해서는 균열의 모서리를 추출해야 하며 일반적인 방법으로는 소벨(sobel) 연산자와 라플라시안(laplacian) 연산자가 있다. 일반적으로 영상에서의 소벨연산자는 (2)와 같이 표시되고 1차 미분의 특성을 갖고 있으며 라플라시안 연산자는 (3)와 같이 표시되고 2차 미분의 특성을 가지고 있다.

$$g(x, y) = \nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}^T = [f_x \quad f_y]^T \quad (2)$$

$$h(x, y) = \nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (3)$$

본 연구에서는 모서리의 방향을 얻기 위하여 소벨 연산자를 사용하였으며 (4)와 같다. 라플라시안 연산은 모든 방향에 대해 동일한 값을 가지며, 방향 불변(rotation invariant) 특성을 가지고 있기 때문에 모서리 추출을 위해 라플라시안 연산자를 사용하였으며 그림 4과 같이 2차 미분의 부호가 바뀌는 점(zero-crossing)을 찾는 방법으로 1차 미분의 지역 최대값을 구하는 형태보다 더 쉽고 효율적으로 모서리를 추출할 수 있다. 또한 이론적으로 모서리가 폐곡선 형태로 얻어지는 특징이 있는데 이러한 성질은 모서리를 통해 영역을 구성하려고 하는 이 연구에서 장점으로 작용한다. 그러나 노이즈에 민감한 단점이 있으므로 강인하게 2차 미분을 구하기 위하여 라플라시안 연산을 수행하기 앞서 가우시안 필터를 적용하였고 (5)와 같다[7].

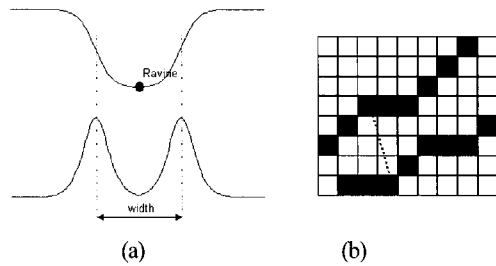


그림 5. (a)골짜기의 1차원 형상 (b) 골짜기의 2차원 형상.
Fig. 5. (a) 1-D profile of ravine (b) 2-D profile of ravine.

$$\phi = a \tan 2 \left(\frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$f_G = f \otimes G \quad (5)$$

여기서

$$G = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \quad (6)$$

앞서 추출된 모서리는 골짜기(ravine)를 구성한다. 골짜기는 그림 5(a)와 같이 두 모서리 사이에서 지역 최소값을 갖는 점으로 정의 하였다. (b)는 2차원 영상의 경우 모서리의 방향으로 스캔하여 (a)와 같은 1차원 프로파일을 얻을 수 있다.

한 모서리에서 그 모서리의 기울기 반대 방향으로 스캔하면서 다음과 같은 조건을 만족하면 스캔을 중단하였다.

- ① 다른 모서리와 만났다.
- ② 영상에서 현재 픽셀의 광도가 모서리에서의 광도보다 높다.
- ③ 스캔의 길이가 특정 값보다 크다.

이중 조건 ①에의하여 중단되었을 경우 프로파일의 지역 최소값의 위치를 구하고 골짜기로 표시하며 골짜기를 중심으로 균열의 균열의 두께를 계산한다. 조건 ③은 계산상의 효율을 높일뿐만 아니라 비균열을 제거하는 효과를 나타낸다. 즉 균열과 같이 길쭉한 형태의 영역이 아닌경우 이 조건에 의하여 제거된다. 반면에 그 값보다 두꺼운 균열을 인식할 수 없다는 문제점이 있다.

영상으로부터 추출된 영역은 그 연결 특성에 따라서 그룹지어져야 한다. 즉, 서로 연결된 화소들의 집합을 찾아서 동일한 그러나 연결되지 않은 집합과는 구별되는 식별자를 부여해야 한다[8]. 특정 균열이라 함은 이 픽셀들의 집합과 동일한 의미를 지니며 본 연구에서는 깊이우선탐색(depth first search)방법을 통해 각 영역을 라벨링 하였다[9].

영역을 구성할 때 영상의 불연속성으로 인하여 영역의 연결성이 다소 떨어질 수 있다. 이는 라벨링에서 서로 같은 영역임에도 불구하고 서로 다른 라벨을 가지게 하고 따라서 특징형상계산에 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 각 영역의 양끝점에 대해서 특정 개수의 픽셀을 직선으로 모델링하여 기울기를 구하고 기울기 방향으로 방향 변화율이 미소하면 이를 하나의 직선으로 정의하였다.

3.2 그래프 탐색을 통한 균열 추출

시작점과 끝점을 알고 있을 경우 영상을 그래프로 표현하고

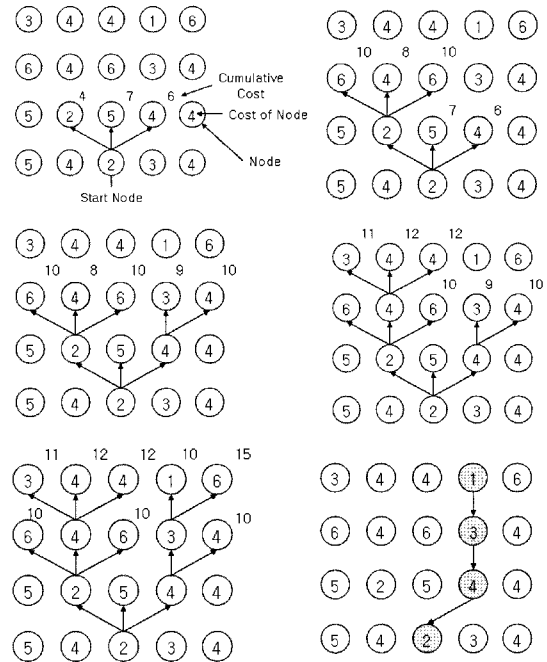


그림 6. Dijkstra 방법의 예
Fig. 6. Example of Dijkstra method

최소 비용의 경로를 찾는 문제로서 경계를 추출할 수 있다. 영상의 픽셀을 노드(node)로 보고 이수에 있는 여덟개의 픽셀을 연결된 노드로 정의하였으며 기본적으로 사용한 알고리즘은 Dijkstra방법을 사용하였다.

- ① 시작노드 nA를 확장해서 이어지는 모든 노드를 큐(queue)에 넣는다. 이어지는 노드의 이전 노드 포인터는 nA로 설정한다. 확장된 노드의 비용을 계산한다.
- ② 큐가 비어있으면 실패한 것이다. 큐에서 최소비용의 노드 ni를 꺼내어서 제거한다. 만약 ni=nB이면 각 노드에 저장된 이전 노드 포인터를 따라서 역추적하고 종료한다.
- ③ 과정 ②의 종료 조건을 만족시키지 못하면 노드 ni를 확장하여 이어오는 모든 노드를 큐에 넣는다. 확장된 노드의 이전 노드 포인터를 ni로 설정하고 각 노드의 비용을 계산한다. 과정 2)로 돌아간다.

이 알고리즘은 항상 최적해를 찾는다. 그러나 확장된 노드의 개수는 실로 엄청나게 많다. 이러한 계산상의 비효율적인 면을 해소하기 위하여 단위 길이당 비용이 특정값 이상일 경우 그 노드를 확장하지 않는 방법을 사용하였고 그림 6.에서 알고리즘을 도식화 하였다.

3.3 균열 측정

추출된 균열 후보 영역은 모두 균열에 의해서 나타난 것은 아니다. 시공 단차, 작업자의 인위적이 표시, 노이즈 또는 얼룩에 의한 것일수도 있다. 이렇게 잘못된 영역은 제거되어야 한다. 균열과 비균열을 구분하기 위하여 각 영역의 기하학적인 특징형상을 다음과 같이 구하고 균열이 아니라고 판단된 경우 그 영역을 제거하였다.

- ① 매우 작은 영역은 노이즈에 의한 것이다.
- ② 길쭉하지 않은 영역은 누수와 같은 얼룩에 의한 영향이다.

③ 너무 곧은 영역은 시공 단차나 전선과 같은 부착물에 의한 것이다.

지금까지 균열은 픽셀의 집합으로 표현되었다. 하지만 이러한 표현 방법은 안전 진단과 같은 상위 수준의 의사 결정에 쓰이기에는 부적합하기 때문에 이를 적절한 물리량으로 표현해야 한다. 본 연구에서는 균열의 폭, 균열의 길이, 균열의 방향을 물리량으로 표현하였다. 이미 모서리로부터 영역을 구성할 때 각 영역을 구성하는 점의 폭은 계산되었다. 이 중 아웃라이어(outlier)를 제거하기 위해서 길이가 5인 메디안 필터를 적용하여 그 폭을 평균하였다. 각 지점의 균열의 두께는 (7)과 같은 방법으로 계산하였다.

$$W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{w}_i, \quad \bar{w}_i = med\{w_{i-2}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1}, w_{i+2}\} \quad (7)$$

길이는 픽셀의 개수로서 쉽게 계산될 수 있다. 대각선 방향의 길이는 $\sqrt{2}$, 수직 수평방향의 길이는 1로 계산한 후 카메라의 보정을 통하여 실제 길이를 측정할 수 있다. 균열의 방향은 관성 모멘트를 통한 직선을 추정하여 결정할 수 있다.

III. 실험장치 및 결과

개발 시스템의 평가를 위한 실험은 실내 구조물의 복도환경, 일반 도로 터널, 지하철 터널에서 실시하였다.

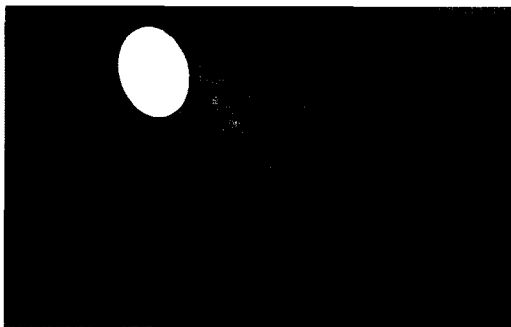


그림 7. 실내 복도 영상획득 실험장치.
Fig. 7. Experimental setup for indoor inspection.

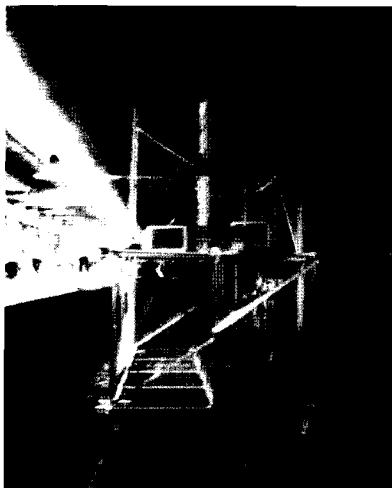


그림 8. 지하철 터널 내벽 영상획득 실험장치.
Fig. 8. Experimental setup for subway inner wall.

1. 실험장치

실내 복도에서 실험을 하기 위하여 알루미늄 프로파일로 컴퓨터, 카메라, 조명, 팬/틸트(pan/tilt)가 가능한 카메라 자세 제어 시스템과 바퀴에 엔코더를 장착하여 실내 복도 벽면의 영상을 획득하였다. 바닥의 불균일로 인해 카메라에 전달되는 진동을 방지하기 위하여 카메라를 받치고 있는 평판을 와이어 로프를 이용하여 지지하였다. 그림 7에서 실험장치를 보여주고 있다.

일반 도로 터널의 경우 실내 복도 실험장치를 차량에 탑재 후 속도 계측 장비를 자동차 타이어에 부착하여 속도를 계측하면서 영상을 획득하였다. 지하철 터널의 경우 레일에서 주행 가능하도록 알루미늄 프로파일을 이용하여 그림 8과 같이 제작하였다.

그림 9는 영상처리 소프트웨어를 보여주고 있으며 소프트웨어 우측에서는 균열에 대한 정보를 보여준다. 그림 10에서는 카메라 보정을 위하여 제공되는 메뉴로서 영상데이터 1 픽셀간의 거리를 mm로 환산하여 입력할 수 있다. 카메라의 보정은 지름이 5mm인 점이 10mm간격으로 평면에 찍혀있는 보정 시편을 이용하였다. 그림 11은 보정을 위해 획득한 영상과 추출된 보정점을 오버레이한 영상을 나타내고 있다.

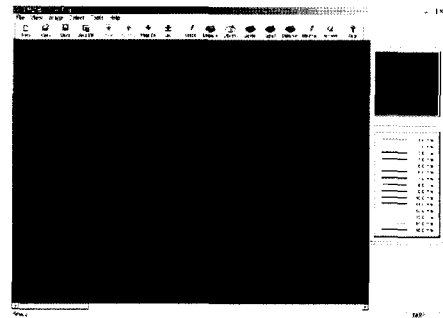


그림 9. 균열검사 소프트웨어.
Fig. 9. Crack inspection software.

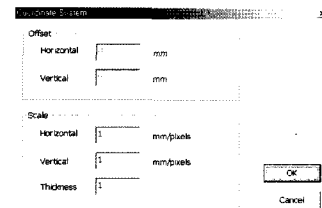


그림 10. 보정을 위한 창.
Fig. 10. Sub window for input mapping data.

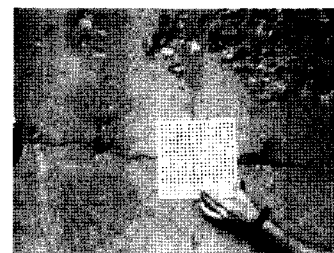


그림 11. 보정을 위한 영상.
Fig. 11. Image for calibration.

표 2. 균열 정보의 예.

Table 2. Example of crack information.

| ID | 종류 | 길이 | 균열 폭 | 시작 X 좌표 | 시작 Y좌표 | 끝 X좌표 | 끝 Y좌표 |
|----|------|-------|------|---------|--------|--------|--------|
| 1 | Diag | 66.7 | 0.3 | 6361 | 2769.4 | 6397.1 | 2754.3 |
| 2 | Horz | 134.2 | 0.3 | 6257 | 2956.9 | 6388.7 | 2953.1 |
| 3 | Horz | 132.7 | 0.3 | 6432.5 | 2960.8 | 6564.1 | 2953.1 |
| 4 | Vert | 190.1 | 0.4 | 7214.6 | 2859 | 7197.5 | 3044.7 |
| 5 | Vert | 247.9 | 0.3 | 7128.2 | 2643.4 | 7227.2 | 2866.7 |

2. 실험결과

그림 12는 실내 복도의 영상을 획득한 것이고 그림 13은 복도 영상의 균열을 추출한 결과이다. 원 영상 우측에 수직으로 된 두 선은 구조물 차체에 있는 홈 부분이다. 따라서 너무 곧은 직선이기 때문에 인식에서 제거 되었음을 볼 수 있다.

그림 14와 15는 남산 터널에서 획득한 영상 및 균열을 추출한 결과이다. 원 영상에서 오염에 의해 넓게 분포되어 있는 부분의 모서리는 추출되지 않고 있는 것을 볼 수 있다.

그림 16과 17은 지하철 터널에서 획득된 영상과 처리 결과를 나타내고 있다. 원 영상에서 철근 마무리 부분이 길쭉한 부분이 아니고 일정 면적을 형성하고 있으므로 균열로 인식하지 않은 것을 볼 수 있다.

위 처리 결과들은 사람의 눈을 통하여 식별할 수 있도록 그림으로 나타낸 것이고 실제 데이터는 수치화되어 표 2과 같이 나타난다.

균열의 방향은 검사할 때 중요시 되는 수직, 수평, 대각선 균열을 표시하고 있으며 길이, 폭, 시작점 위치 및 끝점의 위치가 표시된다.

본 논문에서 제안한 균열 검사 시스템은 균열을 자동으로 인식할 때 주변 환경에 따라 다소 차이가 있으나 대략 인식이 70~80% 정도이며 인식된 균열의 측정 오차는 10% 이내이다.

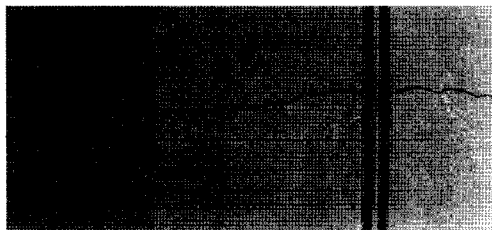


그림 12. 실내 벽면 영상.
Fig. 12. Image of indoor wall.



그림 13. 실내 벽면 영상에서 추출된 균열.
Fig. 13. Extracted cracks of indoor wall.

IV. 결론

기존의 육안검사에 의존한 터널 라이닝부 균열검사의 문제점인 검사 결과의 비 객관성 및 데이터의 효율적 관리, 검사 정밀도, 검사 속도를 해결할 수 있는 방안으로 영상처리를 이용한 검사 시스템을 제안하였다. 또한 제안된 시스템을 실내 복도, 일반 도로 터널 및 지하철 터널에서 실험하여 시스템의 타당성 및 현장 적용 가능성을 확인하였다. 그러나 균열을 비 균열로, 비 균열을 균열로 잘못 인식하는 경우가 있으며 이를 보완하기 위하여 비균열을 균열로 인식한 경우는 이를 제거할 수 있는 기능을 부여하였고 균열을 비 균열로 잘못 인식한 경우는 균열의 시작점과 끝점을 사용자의 입력을

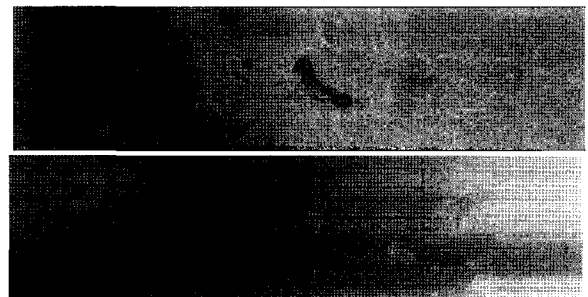


그림 14. 남산 터널의 영상.
Fig. 14. Image of NamSan tunnel.

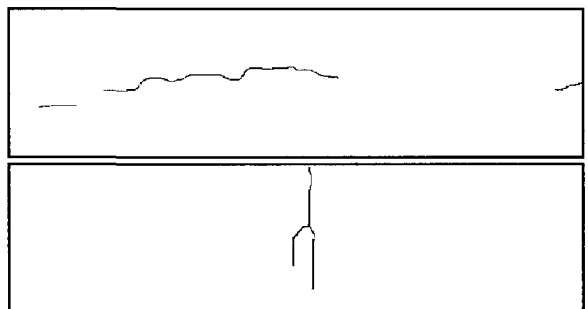


그림 15. 남산 터널의 영상에서 추출된 균열.
Fig. 15. Extracted cracks of NamSan tunnel.



그림 16. 지하철 터널 벽면의 영상.
Fig. 16. Image of subway inner wall.

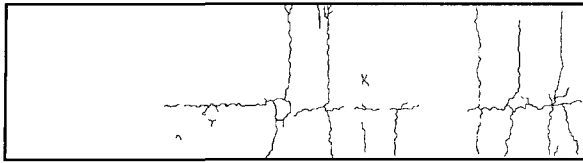


그림 17. 지하철 터널 벽면의 영상에서 추출된 균열.
Fig. 17. Extracted crack of subway inner wall.

받아서 그래프 탐색기법을 사용하여 균열을 인식하도록 반 자동화 하였다.

균열검사 시스템이 전문가 시스템(expert system)으로 발전 하기 위해서 완전 자동화가 이루어져야 하며, 이를 위해 균 열의 특성에 대한 연구가 이루어져야 된다고 생각한다. 차후 유사한 연구를 하는 많은 연구원들에게 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

[1] C. Huber, H. Abiri, S. I. Ganchev, "Analysis of the crack characteristic signal using a generalized scattering matrix

representation," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 4, pp. 477-484, 1997.
 [2] T. Tomikawa, "A study of road crack detection by the meta-genetic algorithm," *AFRICON, IEEE*, pp. 543-548, 1999.
 [3] M. Ohta, M. Ukai, N. Hayashi, and M. Kokubo, "Tunnel inspection system for railways using continuously scanned imaget system," *WCRR'99 Tokyo, Japan*, pp. 1-7, 1999.
 [4] Roadware Group Inc., <http://www.roadware.ca/>
 [5] 한국건설기술연구원, "터널의 안전진단 체계정립 및 균열 자동측정 시스템 개발(I)," 한국건설품질관리연구원 연구보고서, pp. 3-12, 1998.
 [6] "터널보수·보강매뉴얼," 일본철도종합기술연구소, pp. 22-26, 1990.
 [7] A. K. Jain, "Fundamentals of digital image processing," Prentice Hall, USA, 1989.
 [8] R. C. Gonzales and R. E. Woods, "Digital image processing," Prentice Hall, USA, 2002.
 [9] R. E. Tarjan, "Depth-first search and linear graph algorithms," *SIAM J. Computation*, vol. 1, pp. 814-830, 1972.



고 봉 수

1976년 4월 6일생. 2002년 서울산업대학교 기계공학과 졸업. 2002년 ~ 현재 한양대학교 대학원 메카트로닉스 공학과 석사과정. 관심분야는 로보틱스, 컴퓨터 비전.



손 영 갑

1969년 3월 11일생. 1993년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1995년 동대학 석사. 1995-2001 (주) 대우전자. 2003년 ~ 현재 UNIV. of Waterloo 박사과정. 관심분야는 컴퓨터 비전, 시스템 설계.



신 동 익

1974년 9월 19일생. 1997년 한양대 기계공학과 졸업. 2000 동대학 석사. 2000년 ~ 현재 동대학 박사과정, (주) 삼성테크윈 연구원. 관심분야는 머신비전, 시스템자동화.



김 병 화

1955년 1월 12일생. 1982년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업. 1998년 동대학 산업대학원 석사. 1984년 ~ 현재 한국건설기술연구원 수석연구원, 동대학 박사과정관심분야는 메카트로닉스, 건설용 로봇.

한 창 수

제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지 제 7 권 제 5 호 참조.