

# 비전센서를 이용한 콘크리트 터널 라이닝 균열검사 시스템의 개발

고봉수#, 조남규\*

## Development of Vision-Based Inspection System for Detecting Crack on the Lining of Concrete Tunnel

Bong Soo Ko<sup>#</sup> and Nam Ku Jo<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

To assess tunnel safety, cracks in tunnel lining are measured by inspectors who observe cracks with their eyes. A manual inspection is, however, slow and subjective. This paper, therefore, proposes vision-based inspection system for measuring cracks in the tunnel lining that inspects cracks fast and objective. The system is consisted of an on-vehicle system and a lab system. An on-vehicle system acquires image data with line CCD camera. A lab system extracts crack then inform their thickness, length and orientation by using image processing. To improve accuracy of crack recognition the geometric properties of a crack was applied to image processing. The proposed system were verified with experiments in both laboratory and field environment.

**Key Words** : Crack (균열), Image (영상), Inspection (정밀검사)

### 1. 서론

지난 수십년 동안 지하철, 철도, 고속도로 및 도로등에 많은 콘크리트 터널이 건설되었으며 앞으로도 계속 건설될 것이다. 이러한 구조물들은 최근에 들어서 그 안전 문제가 대두되고 있고, 안전성을 확보하기 위하여 주기적으로 구조물의 안전검사가 실행되고 있다.

KICT<sup>1</sup> 에 의하면 구조물의 상태 및 안전성을 판단하는데 있어서, 구조물 표면에 존재하는 균열은 가장 직접적인 정보를 제공할 뿐만 아니라 이를 통해서 정밀 안전진단의 수행항목, 절차, 방

법 등을 결정하게 된다. 이렇듯 구조물의 유지·보수 체계에 있어서 균열 검사는 출발점이 된다고 볼 수 있음에도 불구하고, 주로 검사자의 육안조사에 의존하고 있어 객관적 데이터를 얻기 어려울 뿐만 아니라 검사 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 특히 자동차 터널 및 지하철등은 검사중 통행의 제한이 필요하여 여러가지 다른 문제들이 발생할 수 있다.

해외에서는 이러한 문제점을 인식하여, 도로 표면, 교각, 터널 라이닝과 같은 대형 구조물의 초기 육안 균열검사를 자동화 할 수 있는 시스템을 개발하는 데 많은 노력을 기울이고 있으며 영상화

# 2003년 2월 15일 접수; 게재승인일: 2003년 11월 14일  
교신저자: 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과  
Email bongsoo95@ihanyang.ac.kr Tel. (031)400-4062  
\* 한양대학교 기계정보경영학부

득을 통한 검사시스템은 이미 외국의 몇몇 업체에 의해 상용화 되고 있다.

캐나다 로드웨어(Roadware)<sup>2</sup> 사는 도로 표면의 상태를 검사하기 위한 시스템을 개발하여 상용화 하였다. 이 시스템은 CCD 카메라, 자이로, 초음파 센서를 차량에 탑재하여 도로표면의 영상을 80 km/h 의 속도로 3~4 cm 분해능을 갖도록 획득할 수 있다. 영상내의 균열의 검출은 디지털 영상처리를 이용하고 있으나 작업자가 균열에 대한 명암, 대비 및 표면상태에 대한 변수를 입력해야 한다. 일본의 코마츠(Komatsu) 사는 자체적으로 개발한 레이저 발진부와 수신부를 차량에 탑재하여 도로 표면 및 터널 영상을 획득하는 시스템을 개발, 상용화 하였으며 Tomikawa<sup>3</sup> 는 유전알고리즘을 이용하여 영상에서 도로의 균열을 자동으로 검출하는 알고리즘이 연구중이다. 일반 아스팔트 도로와 콘크리트 구조물은 균열의 발생원인, 형상, 허용균열의 크기등이 다르기 때문에 다른 방법들이 적용되어야 한다. Ohta<sup>4</sup> 에 의하면 일본철도종합연구소(Railroad Technical Research Institute, RTRI)에서는 라인 스캔 카메라를 이용하여 철도 터널표면 영상을 획득하는 시스템을 개발하였으며 균열 자동인식 알고리즘은 연구중에 있다.

이들 시스템은 획득한 영상을 이용하여 구조물의 오염, 박리, 박태등 여러 환경에 대한 정보를 획득하는데 유용하게 사용되고 있다. 하지만 영상 획득 단계에만 머무르고 있으며, 균열을 추출 및 측정 할 수 있는 알고리즘은 아직 연구 단계에 있다. 따라서 영상을 더욱 선명하게 획득 할 수 있는 방법과, 획득된 영상을 이용하여 균열을 추출하고 측정 할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다.

일반적으로 구조물의 표면 상태를 검사하기 위해서는 표면을 영상화 하는 방법이 많이 쓰이고 있으며, 표면을 영상화 하는 방법은 레이저를 이용하는 방법과 카메라를 이용하는 방법이 있다.

레이저의 경우는 국외 균열 검사 시스템이 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 운전 비용에 큰 부담을 줄 수 있다. 따라서 저가의 시스템 개발을 위해서는 카메라를 이용하여 구조물의 표

면을 영상화하고 획득된 영상으로부터 구조물의 상태를 판단 할 수 있는 균열 데이터 획득에 관한 연구가 절실히 요구된다.

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

## 2. 균열검사 시스템

### 2.1 검사대상

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

균열의 발생 원인은 여러가지 원인이 복합적으로 작용하여 발생하며, 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 추가하중의 증가, 라이닝과 원지반 사이의 공극에 의한 뒤틀모멘트 혹은 편압의 발생, 좌, 우측 측벽 하부기초의 침하 등이 있는 것으로 알려져 있다.

최근 국내터널에서 시행된 콘크리트 라이닝에 발생된 균열을 조사 분석한 결과에 의하면 균열의 형태는 종방향 균열, 횡방향 균열, 전단균열, 복합균열로 크게 구분된다. 종방향 균열은 터널 중심선과 평행하게 터널 천장부와 어깨부에 터널 종단 방향으로 발생한 직선상의 균열형태이며, 횡방향 균열은 터널 중심선에 직교하여 횡방향으로 발생하는 균열형태이고, 전단균열은 터널 중심선에 대각선 방향으로 나타나는 균열이며, 복합균열은 터널 천장에서 발생한 종방향 균열이 전단균열의 형태로 진전 되거나 종방향 균열이 횡방향 균열과 복합적으로 나타나는 균열이다.

MOST<sup>5</sup> 에 의하면 상기 균열중 약 42% 이상이 종방향 균열이며 횡방향 균열이 약 11%, 전단균열

이 30% 정도를 차지한다. 따라서 본 논문에서는 종방향 균열, 횡방향 균열, 전단 균열 검사를 목표로 삼고 있다.

### 2.2 시스템 구성

본 연구에서 최종 목표하는 시스템은 Fig. 1 과 같이 데이터 획득 시스템과 데이터 관리 시스템으로 구분 할 수 있다. 데이터 획득 시스템은 터널 내부에서 이동하면서 잡음을 최소화 하고 균열과 비 균열의 대비를 최대화 시키면서 터널 라이닝 부의 영상을 획득할 수 있는 광학 장치, 기계적 요소, 획득된 영상을 이용하여 균열을 추출하고 추출된 균열의 특징 데이터를 획득할 수 있는 소프트웨어로 구성된다. 데이터관리 부분은 획득된 균열 데이터는 물론 설계자료, 시공자료, 이력 자료등을 체계적으로 관리, 보존하고 효율적으로 활용할 수 있도록 데이터베이스화 하며, 구조물의 균열을 한 눈에 파악할 수 있도록 균열 지도, 구조물 위치에 따른 균열 밀도 및 균열의 진행성을 균열의 종류별로 분석한 정보등을 제시하게 된다.

본 논문에서는 데이터 획득 시스템에 대하여 언급할 것이며 이 시스템은 터널 라이닝부의 균열 검출을 위하여 제작된 영상 획득 장치와 획득된 영상을 이용하여 균열을 추출 하고 추출된 균열의 특징 데이터를 시각화 및 수치화 하는 알고리즘으로 구성되어 있다.

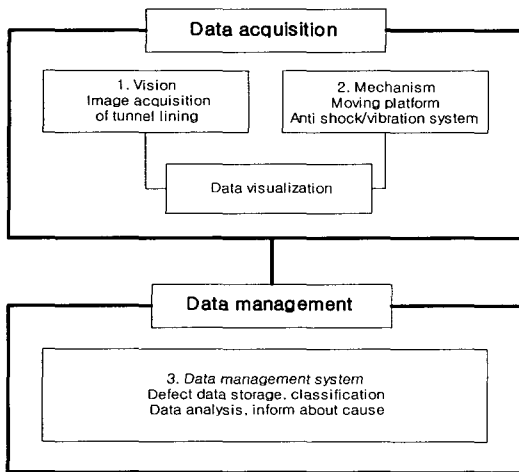


Fig. 1 Vision-based inspection system

데이터 획득 시스템은 Fig. 2 와 같이 차량 시

스템(On-Vehicle System)과 해석 시스템(Lab System)으로 구성된다. 차량 시스템은 터널 라이닝부와 평행한 방향으로 이동 하면서 터널 라이닝부의 영상을 획득하는데 사용된다. 해석 시스템은 차량 시스템에 의하여 저장된 영상을 이용하여 균열의 정보를 얻는데 사용된다.

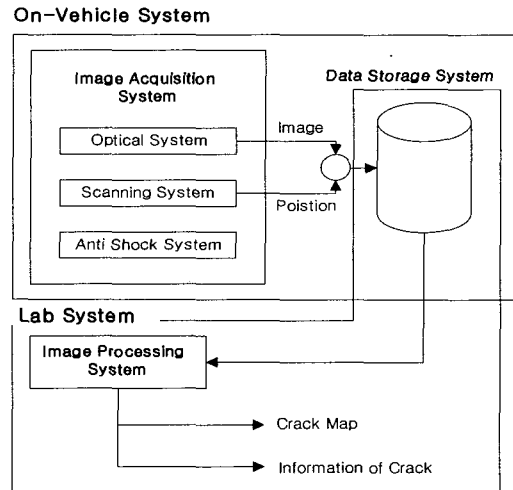


Fig. 2 Schematic diagram of data acquisition system

### 2.3 차량시스템

차량 시스템은 Fig. 3 과 같이 영상을 획득할 수 있는 CCD 카메라와 프레임그래버, 카메라의 FOV(Field Of View)를 제어하기 위한 장치, 충격 및 진동방지를 위한 장치, 조명장치, 이동 속도를 측정 할 수 있는 엔코더와 각 장치를 제어하기 위한 컴퓨터로 구성되어 있다.

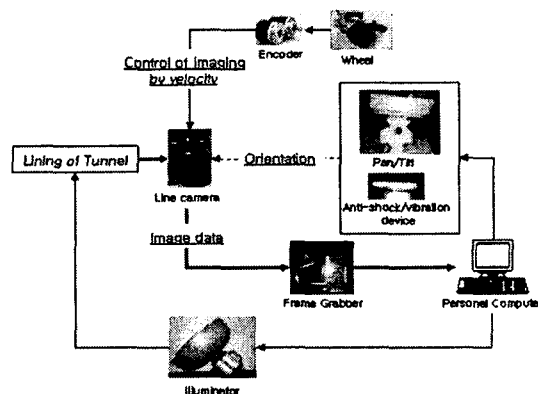


Fig. 3 On-vehicle system

### 2.3.1 카메라

Table 1 은 10 m 의 폭을 갖는 구조물에 대해서 1 mm/pixel 의 정밀도를 갖는 영상을 획득하기 위해 필요한 전형적인 카메라의 개수를 비교한 것이다.

Table 1 Matrix vs. linescan camera

	Matrix Camera		Linescan Camera
Density	512×512	2000×2000	5000
Cost	Low	High	Low
# of Cam.	20 / 10m	5 / 10m	2 / 10m
Resolution	1 mm/pixel		

TV 카메라를 사용했을 경우 라인스캔 카메라와 같은 정밀도를 얻기 위해서 필요한 카메라 개수가 10 배가 되는 것을 볼 수 있다. 또한 매트릭스 카메라의 경우, 구조물의 전체 영상을 얻기 위해서는 각 카메라에서 획득한 영상을 합성해야 하는데, 이 과정에서 영상간의 불연속 혹은 겹침(overlap)이 발생하고 이를 처리하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 고밀도(4096 pixel) 라인스캔 카메라를 영상획득 센서로 선정하였다. 일반적인 매트릭스 카메라와 달리 라인스캔 카메라는 별도의 정밀한 스캐닝 메커니즘(scanning mechanism)이 필요한데, 이것은 2.3.3 절에서 다루도록 하겠다. Table 2 는 본 연구에서 사용한 카메라의 사양을 나타내고 있다. 영상데이터의 정밀도를 0.3mm/pixel 로 하면 촬영 대상과 약 2m 거리에서 최대 24km/h 의 속도로 이동 하면서 영상을 획득 할 수 있다.

Table 2 Specification of the camera

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

### 2.3.2 조명

Park<sup>6</sup> 에 의하면 조명은 영상획득시 영상 품질을 좌우하는 중요한 변수이다. 일반적인 카메라를 이용한 검사 시스템의 조명 장치는 검사 대상과 근거리에 있고 조명을 투사할 영역이 작다. 그러나 본 연구에서 사용된 조명 장치는 검사 대상과의 거리가 멀고 라인스캔 카메라를 이용하기 때문

에 넓은 영역에 많은 조명을 투사해야 한다. 또한 시간에 따라 조사분포가 변하지 않고 투사 영역에 균일한 광량을 조사할 수 있어야 한다. 따라서 할로겐 광원을 이용한 최대 1000 W 의 출력을 낼 수 있는 조명을 선정하였고 넓은 영역에 균일하게 조명을 투사하기 위한 반사경(reflecting mirror)과 확산렌즈(scattering lens)를 이용하였다.

### 2.3.3 영상화 제어

이동체 위에 카메라를 탑재하고 이동하면서 검사 대상체 표면을 영상화할 때 이동속도가 일정하지 않으면 동일한 크기의 물체가 속도 변화에 따라 크기가 변화한다. 이러한 크기의 변화는 영상화된 데이터를 처리하여 균열 정보를 추출할 때 오차를 유발하는 요인이 된다. Fig. 4 의 (a)는 지하철 터널 벽면을 영상화한 데이터의 일부를 나타낸다. (b)는 일정 속도일 때 영상화된 시공 연결부 영상 데이터이며, (c)는 이동체가 가속시 시공 연결부의 크기가 감소하는 것을, (d)는 속도 감속시 크기가 증가되는 것을 나타낸다.

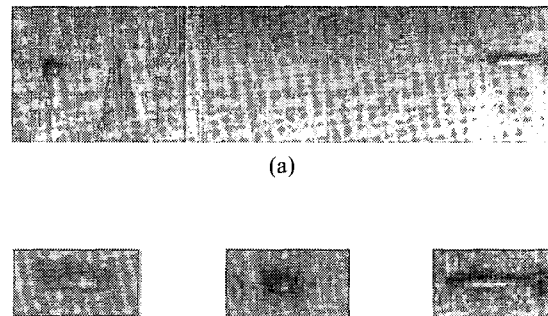


Fig. 4 (a) Image of tunnel lining (b) Uniform motion (c) Acceleration motion (d) Deceleration motion.

따라서 이동체의 속도가 변화할 경우, 일정한 간격으로 영상화할 수 있는 방법을 적용하여 속도 변화에 무관하게 일정한 영상을 획득하여야 한다. 속도 변화에 무관하게 일정한 영상을 획득하기 위해서 라인 카메라의 영상화 속도(Line rate) 조절을 통해 이동체의 이동 거리 방향에 대하여 일정한 간격으로 검사 대상을 영상화 한다. 영상화 속도는 1 초 동안 대상체 이동 거리를 픽셀당 해상도로 나눈 값이며, 단위는 kHz 이다.

카메라의 영상화 속도 조절은 이동체의 속도 변화를 계측하여 이를 트리거(Trigger) 신호로써

카메라에 피드백하여 조절한다. 이동속도의 계측은 일반적으로 타코미터를 이용할 수 있지만 카메라의 영상화 속도조절은 펄스 신호에 의해 가능하므로 속도 계측은 엔코더를 이용하였다.

속도계측을 위한 엔코더의 회전당 펄스의 수는 영상의 정밀도, 이동체 속도, 엔코더가 장착되는 바퀴 크기와 카메라 영상화 속도에 의해 결정된다. 이동체 속도를 계측하기 위해 사용될 엔코더의 회전당 펄스 발생 횟수를 P, 바퀴의 반지름을 r, 초당 바퀴 회전수를 R, 영상 데이터의 픽셀당 해상도를 C(mm/pixel)라 두면 이동체 속도를 계측하는 엔코더의 초당 펄스 발생 횟수는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \frac{2\pi r R}{C} \quad (1)$$

영상의 획득은 실내의 평탄한 바닥에서 이루어 지는 것이 아니라 현장에서 이루어진다. 따라서 바닥면의 불균일로 인한 진동은 영상의 초점을 흐리게 만들어 균열추출이 어려워진다. 따라서 진동을 저감시키기 위하여 방진 캐스터 및 와이어로프를 이용하여 방진시스템을 설계하였다.

#### 2.4 해석 시스템

시각으로 균열을 인식하는데 있어서 사용되는 정보는 대상에서 반사되는 빛의 양이다. 균열은 표면이 갈라진 부분이며 표면에 비하여 작은양의 빛을 반사시키게 된다. 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 알고리즘의 순서도는 Fig. 5와 같다.

균열 추출이란 전체 영상과 균열이라고 판단되는 부분을 나누는 것 이라고 할 수 있으며 이는 영상 분할(Image segmentation) 이라고 부른다. 영상에서 균열과 비 균열은 각각의 명암정보의 차이를 이용하고 있으며 이는 영상의 대비(Contrast)가 클수록 명암 정보의 차이가 커지며 조명의 차이가 다소 있어도 강인하게 균열과 비 균열을 구별할 수 있게 되며, 이렇게 영상의 대비를 크게 할 수 있는 방법이 히스토그램 평준화(Histogram Equalization)이다.

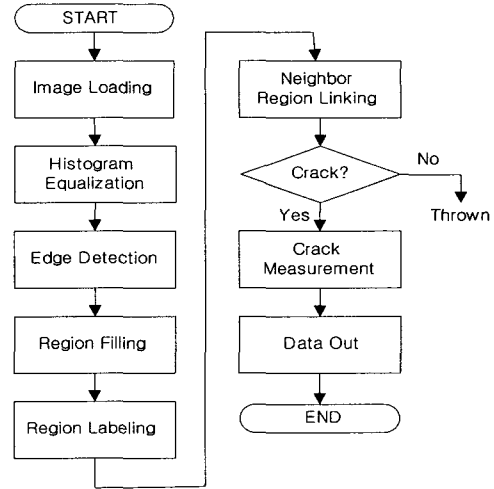


Fig. 5 Algorithm for crack detection and measurement

균열 추출을 위해서는 균열의 모서리를 추출해야 하며 Gonzales<sup>7</sup>에 의하면 일반적인 방법으로는 소벨(Sobel) 모서리 연산자와 라플라시안(Laplacian) 모서리 연산자가 있다. 일반적으로 영상 f의 (x,y) 점에서의 소벨 연산자는 식(2)와 같이 표시되고 1 차 미분의 특성을 갖고 있으며 라플라시안 연산자는 식(3)과 같이 표시되며 2 차 미분의 특성을 가지고 있다.

$$g(x,y) = \nabla f(x,y) = \left[ \frac{\partial f}{\partial x} \quad \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T = [f_x \quad f_y]^T \quad (2)$$

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

본 연구에서는 모서리의 방향을 얻기 위해서 소벨 연산자를 사용하였으며, 모서리의 추출을 위해서는 라플라시안 연산자를 이용하였다. 라플라시안 연산자를 이용한 모서리 추출은 Fig. 6과 같이 2 차 미분의 부호가 바뀌는 점(Zero-crossing)을 찾는 방법으로 1 차 미분의 지역 최대값(Local maxima)을 구하는 형태보다 더 쉽고 효율적으로 모서리를 추출할 수 있다. 또한 이론적으로 모서리가 폐곡선의 형태로 연결되는 특징이 있는데, 이러한 성질은 모서리를 통해 영역을 구성하려고 하는 이 연구에서는 큰 장점으로 작용한다고 할 수 있다.

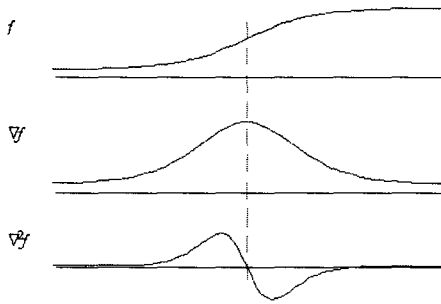


Fig. 6 1-D edge profile of the zero-crossing

앞서 추출된 모서리는 골짜기(Ravine)를 구성한다. 골짜기는 Fig. 7 (a)와 같이 두 모서리 사이에서 지역 최소값을 갖는 점으로 정의 하였다. Fig. 7 (b)는 2 차원 영상의 경우, 모서리의 방향으로 스캔하여 (a)와 같은 1 차원 프로파일을 얻을 수 있다.

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

- i) 다른 모서리와 만났다.
- ii) 영상에서 현재 픽셀의 광도가 모서리에서의 광도보다 높다.
- iii) 스캔 길이가 특정 값보다 크다.

영상으로부터 추출된 영역은 그 연결 특성에 따라서 그룹 지어져야 한다. 즉, 서로 연결된 화소들의 집합을 찾아서 동일한, 그러나 연결되지 않은 집합과는 구별되는 식별자(보통, 정수)를 부여해야 한다. 특정 균열이라 함은 이 픽셀들의 집합과 동일한 의미를 지니며 본 연구에서는 깊이우선 탐색(Depth First Search) 방법을 통해 각 영역을 라벨링 하였다.

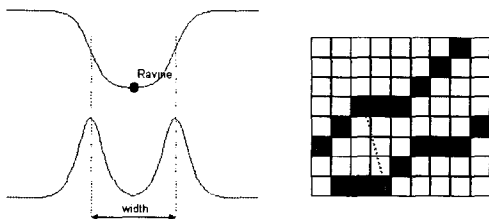


Fig. 7 (a) 1-D profile of ravine (b) 2-D profile of ravine

영역을 구성할 때 영상의 불연속성으로 인하여 영역의 연결성이 다소 떨어질 수 있다. 이는 라벨링에서 서로 같은 영역임에도 불구하고 서로 다른 라벨을 가지게 하고 따라서 특징 형상(Features) 계산에 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 각 영역의 양 끝점에 대해서, 끝에서 특정 개수의 픽셀을 직선으로 모델링하여 기울기를 구하고 기울기 방향으로 방향 변화율이 미소하면 이를 하나의 직선으로 정의 하였다.

앞에서 설명한 단계에서 추출된 모든 영역이 균열에 의해서 나타난 것은 아니다. 시공 단차에 의한 것일 수 있고 작업자가 인위적으로 한 마크일 수도 있다. 또한 노이즈나 얼룩에 의한 것일 수도 있다. 이러한 잘못된 영역은 제거되어야 한다. 균열과 비 균열을 구분하기 위해서 각 영역의 기하학적인 특징 형상을 다음과 같이 구하고 균열이 아니라고 판단된 경우 그 영역을 제거하였다.

- i) 매우 작은 영역은 노이즈에 의한 것이다.
- ii) 길쭉하지 않은 영역은 누수와 같은 얼룩에 의한 영향이다.
- iii) 너무 곧은 영역은 시공 단차나 전산과 같은 부착물에 의한 것이다.

지금까지 균열은 픽셀의 집합으로서 표현되었다. 하지만 이러한 표현방법은 안전 진단과 같은 상위 수준의 의사 결정에 쓰이기에는 부적합하다. 따라서 이를 적절한 물리량으로 표현해야 한다. 본 연구에서는 균열의 폭, 균열의 길이, 균열의 방향으로 물리량을 표현 하였다. 이미 모서리로부터 영역을 구성할 때 각 영역을 구성하는 점의 폭을 계산하였다. 길이는 픽셀의 개수로서 쉽게 계산될 수 있다. 대각선 방향의 길이는  $\sqrt{2}$ , 수직 수평 방향의 길이는 1로 계산한 후 카메라 보정을 통하여 실제 길이를 측정 할 수 있다. 균열의 방향은 관성 모멘트를 통한 직선을 추정하여 결정할 수 있다.

### 3. 실험장치 및 실험결과

개발 시스템의 평가를 위한 실험은 실내 복도 환경과 일반 도로 터널, 지하철 터널에서 실시 하였다.

### 3.1 실험장치

실내 복도에서 실험을 하기 위하여 알루미늄 프로파일에 컴퓨터, 카메라, 조명, 패닝(Panning)과 틸팅(Tilting)이 가능한 카메라 자세제어 시스템과 바퀴에 엔코더를 장착하고 진동을 방지하기 위하여 카메라가 고정되어있는 평판을 와이어 로프(Wire rope)로 지지하였다. 라인 스캔 카메라의 특성으로 정지 상태의 물체를 촬영 할 수 없고 물체 혹은 카메라가 이동해야 영상획득이 가능하기 때문에 알루미늄 프로파일을 일반 사람이 걷는 속도인 약 3~4km/h 로 작업자가 손으로 밀면서 실내 복도 벽면의 영상을 획득하였다. 이때 카메라의 이동 속도 변화가 다소 있으나 엔코더의 펄스 신호로 카메라의 영상화 속도가 조절됨으로 속도와 무관하게 일정한 간격으로 영상이 획득가능하도록 하였으며 조리개의 심도를 깊게하여 장치의 진행 중에 카메라와 벽면의 거리가 다소 불균일해도 선명한 영상을 획득할 수 있게 하였다. Fig. 8 은 실내 복도 실험장치를 나타내고있다.

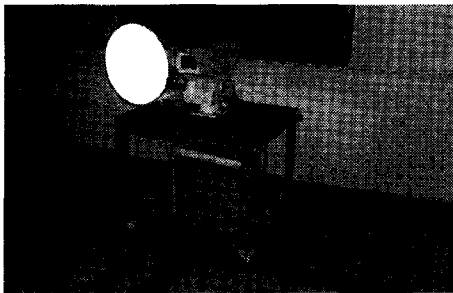


Fig 8. Experimental setup for indoor inspection

도로 터널 실험의 경우는 실내 실험장치를 차량에 탑재하고 엔코더에 원판을 장착하여 원하는 거리마다 일정한 펄스가 나오게 하여 자동차 타이어에 마찰차와 같은 형식으로 부착하여 속도를 계측하며 약 10~20km/h 의 속도로 영상을 획득 하였다. 지하철 터널의 경우는 레일에서 주행 가능하도록 Fig. 9 와 같이 철로 위에서 주행할 수 있도록 알루미늄 프로파일을 이용하여 제작하였다. 바퀴는 철로에서 오는 진동을 감소 시키기 위하여 우레탄 재질을 사용하였으며 속도 계측을 위하여 바퀴에 엔코더를 설치하였고 작업자가 약 4~10km/h 의 속도로 밀면서 영상을 획득 하였다.

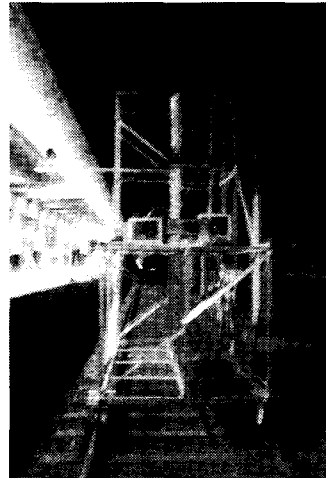


Fig. 9 Experimental setup for subway inner wall

영상처리 소프트웨어는 VC++을 이용하여 개발하였다. Fig. 10 은 영상처리 소프트웨어를 보여주고 있으며 소프트웨어 우측에서는 균열에 대한 정보를 보여준다.

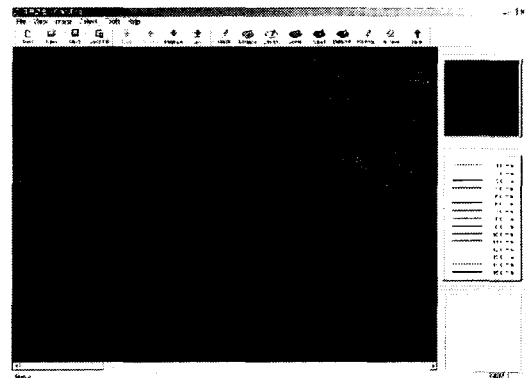


Fig. 10 Crack extraction software

Fig. 11 은 검사 대상체의 실제 거리를 영상 데이터로 맵핑할 때 카메라 보정을 수행하기 위해 제공되는 메뉴로써 영상데이터 1 픽셀간의 거리를 mm 로 환산하여 입력할 수 있다.

카메라의 보정은 지름이 5mm 인 검은색 원이 10mm 간격으로 평면에 찍혀 있는 보정 시편을 이용하였다. Fig. 12 에서는 보정을 위해 획득한 영상과 추출된 보정점을 오버레이한 영상을 나타내고 있다.

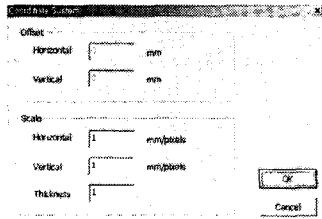


Fig. 11 Sub window for input mapping data

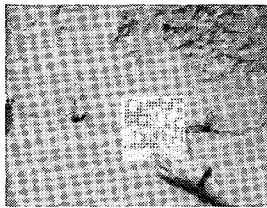


Fig. 12 Calibration

### 3.2 실험결과

Fig. 13 은 실내 복도의 영상을 촬영한 것이고 Fig. 14 는 복도 영상의 균열을 추출한 결과이다. 원 영상 우측에 수직으로 된 두 선은 구조물 자체에 있는 홈 부분이다. 따라서 너무 곧은 직선이기 때문에 조건에 의하여 균열 인식에서 제거되었음을 볼 수 있다.

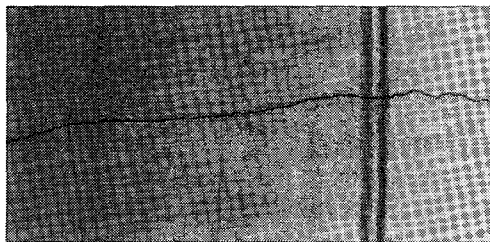


Fig. 13 Image of indoor wall

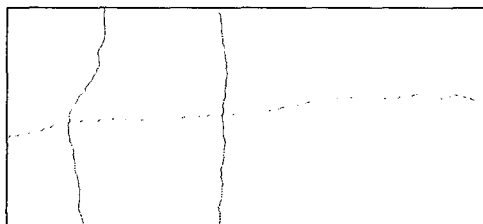


Fig. 14 Extracted cracks of indoor wall

Fig. 15 와 16 은 남산터널에서 획득된 영상 및 균열을 추출한 결과이다. 원 영상에서 오염에 의하여 면적을 형성하고 있는 부분의 모서리는 제거된 것을 확인 할 수 있다.

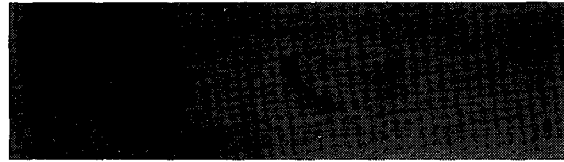


Fig. 15 Image of NamSan tunnel

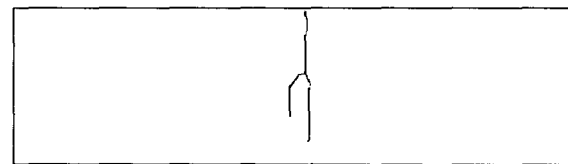
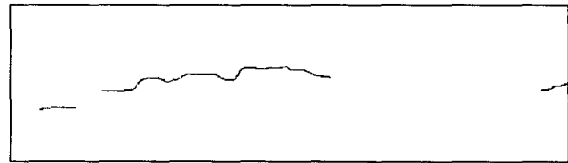


Fig. 16 Extracted crack of Namsan Tunnel

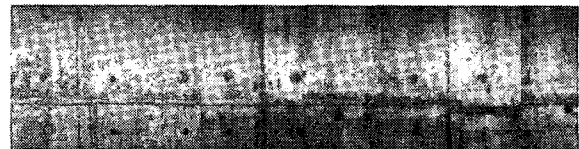


Fig. 17 Image of subway inner wall



Fig. 18 Extracted crack of subway inner wall

Fig. 17 과 18 은 지하철 터널에서 획득된 영상



과 처리 결과를 나타내고 있다. 원 영상에서 철근 마무리 부분이 길쭉하지 않고 일정한 면적을 형성함으로 균열로 인식하지 않는 것을 볼 수 있다.

위 처리 결과들은 사람의 눈을 통하여 식별할 수 있도록 그림으로 나타낸 것이고 실제 데이터는 수치화 되어 Table 4 와 같이 나타난다.

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

본 논문에서 제안한 균열 검사 시스템은 균열 인식률이 주변 상황에 따라서 다소 차이가 있으나 대략 약 80%정도 이며 인식된 균열에 대한 그 측정 오차는 10% 이내이다.

Table 4 Example of Data sheet

ID	Type	Length	Width	Start X Posion	Start Y Posion	End X Posion	end Y Posion
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

#### 4. 결 론

육안검사에 의존한 터널 라이닝부 균열검사의 문제점인 검사결과의 비 객관성 및 데이터의 효율적 관리, 검사 정밀도, 검사중 터널내 차량 통제, 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.

도로 터널 및 지하철 터널과 같은 열악한 환경에서 선명한 영상을 획득하기 위하여 촬영 영역에 균일한 광량 및 조사분포를 유지하기 위하여 조명의 선정이 중요하여 할로겐 광원을 사용하는 1000W 의 조명을 사용하였다. 카메라가 이동하면서 촬영을 하기 때문에 바닥면의 불균일로 인한 미세한 진동으로 영상의 선명도가 떨어지는 것을 방지하기 위하여 방진 캐스터 및 와이어로프를 사용하였다. 이동 속도와 상관없이 일정한 거리마다 영상을 획득하기 위하여 엔코더를 사용하여 일정 거리마다 스캔을 할 수 있도록 메커니즘을 구성하였다.

균열 인식단계에서 일반적으로 영상처리에 쓰이는 명암값의 차이만을 이용하여 모서리를 추출하는 방식은 균열뿐 아니라 다른 시설물의 모서리 또한 추출하게 됨으로 균열과 비 균열의 특징을 고찰하여 균열추출에 적용하였다. 그러나 아직 균열 인식률은 약 80%이므로 작업자의 수작업이 요구된다. 이와 같은 문제는 비전센서를 사용하는 방식에서 완전히 제거하기는 어렵지만 균열검사 시스템이 전문가 시스템(Expert system)으로 발전하기 위하여 완전 자동화가 이루어져야 하며, 이를 위해 균열의 특성에 대한 연구가 이루어져 균열 인식률이 더욱 높아져야 한다. 균열의 인식률을 높이기 위한 연구가 차후 진행될 예정이다.

#### 참고문헌

1. KICT, "Developments of the Safety Assessment System and Crack Investigation Equipment for Tunnels (1)," Report of the Korea Institute of Construction Technology, pp. 5-69, 1998.
2. Roadware Group Inc., <http://www.roadware.ca/>
3. Tomikawa T., "A Study of Road Crack Detection by the Meta-Genetic Algorithm," AFRICON, IEEE, pp. 543-548, 1999.
4. Ohta Masaru, Ukai Masato, Hayashi Naoki, Kokubo Masatoshi, "Turnnel Inspection System for Railways Using Continuously Scanned Inage System," WCRR'99 Tokyo, Japan, pp. 1-7, 1999.
5. MOST, "Development of Inspection and Diagonosis System for Safety and Maintenance in Tunnel," Report of the Ministry of Science & Technology, pp. 105-108, 1998.
6. Pahk Jae Heui, Hwang Min Young, "Dimensional Measurement Using the Machin Vision," J. of KSPE, Vol. 18, No. 3, pp. 10-17, 2001.
7. Gonzales R.C. and Woods R.E., "Digital image processing," Prentice Hall, pp. 75-146, 2002.