

# 교량점검을 위한 비전 기반의 균열검출 알고리즘 개발

## Development of a Vision-based Crack Detection Algorithm for Bridge Inspection

김진오\*, 박동진  
(Jin-Oh Kim and Dong-jin Park)

**Abstract :** We have developed a vision based crack detection system and algorithm to inspect base side of bridges. After human operator decides from vision images captured if lines on base side are cracks or dirt, our algorithm finds automatically the length, the width and the shape of cracks. The system has been tested with a robot extender on a truck in real environment and has been proved to be very useful to reduce inspection cost as well as the data management.

**Keywords :** bridge base inspection system, robot, crack, vision, algorithm

### I. 서론

현재 시행되고 있는 교량(바닥판)의 점검작업은 대부분 육안으로 이루어지고 있으나 육안검사방법은 많은 작업시간과 인력을 필요로 하며 점검 시 작업자의 주관이 포함되어 작업 결과에 객관성 및 신뢰성이 부족해지는 문제점을 안고 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 효율적이고 합리적인 점검을 수행할 수 있도록 비전기반의 균열검출 시스템을 개발하고자 한다.

교량 점검과 유사한 문제점을 갖고 있는 도로 검사분야에서는 CCD카메라가 장착한 차량을 이용해 노면상태를 점검하는 머신비전 시스템을 개발한 바 있다[1,2]. 하지만 교량(바닥판) 검사는 교량하부에 접근이 어려운 작업의 특성상 원거리에서 작업이 이루어지며 측정거리가 변하는 경우가 빈번히 발생하므로 노면검사에 사용되는 비전시스템을 적용할 경우 다음과 같은 어려움이 발생하게 된다.

- 1) 원거리 측정 시 망원렌즈로 인한 초점조절 어려움,
- 2) 측정거리 변화 시 렌즈의 줌(zoom)배율 변경문제.

이와는 별도로 균열검출을 위해 콘크리트 구조물에 발생하는 균열을 영상으로 획득한 뒤 균열의 두께와 길이를 측정하는 연구가 이루어졌다[3,4]. 이 연구에서는 작업자에 의해 균열검출범위 기준이 되는 검출기준점(seed point)을 입력 받고 이를 이용해 균열을 추적해 나가며 균열의 두께를 정밀하게 측정하는 방식을 제안하였다.

본 논문에서는 교량(바닥판)의 검사에 적합하도록 원거리 측정과 측정거리에 따른 배율 자동 조절이 가능한 화상획득 시스템을 제작 하였다. 균열검출에는 기존의 방식에 균열진행방향탐색 알고리즘과 Bezier curve를 이용하여 측정정밀도를 높이고 최종 표시되는 균열을 실제 균열과 유사하게 표현하는 방식을 제안하였다. 또한 가상의 균열이 출력된 캘리브레이션(Calibration)판넬을 이용해 화상획득 시스템과 제안된

표 1. 교량상태등급.

Table 1. Condition rating of a bridge.

등급	균열	
	일방향 균열	이방향 균열
A	없음	없음
B	폭 0.1~0.2mm, 길이 30cm 이하	없음
C	폭 0.1~0.2mm, 길이 50cm 이상 (20츠 이상간격)	0.1~0.2mm
D	폭 0.1~0.2mm, 길이 50cm 이상 (20츠 이하간격)	0.2~0.3mm
E	폭 0.4mm 이상	0.2~0.3mm

알고리즘의 성능을 증명하였으며 이를 통해 3M의 원거리측정 시  $\pm 0.05\text{mm}$  이내의 정밀 측정이 가능함을 보였다.

### II. 균열 사양

현재 교량의 안정등급은 균열의 두께와 길이에 따라 표 1과 같이 나뉘어진다. 균열이 없는 최고등급인 A를 제외한 등급의 측정 단위는 0.1mm, 두께 범위는 0.2~0.4mm임을 알 수 있다. 본 연구에서는 교량등급을 정확히 판별할 수 있도록 균열 측정범위를 0.2~1.0mm, 측정정밀도는 0.1mm 이내로 기준사양을 설정하였다.

### III. 화상획득 시스템 구성

교량바닥판의 영상을 획득하기 위해 제작한 화상획득 시스템과 테스트 장치를 그림 1에 보였다. 화상획득시스템은 디지털 카메라, 초음파센서, Embedded PC로 구성되어 있으며 Embedded PC는 1mm정밀도로 검출되는 초음파센서 측정거리와 작업자가 설정한 화상획득정밀도에 따라 카메라의 줌(Zoom)배율을 자동으로 조절하며 영상을 획득할 수 있도록 하였다. 측정거리가 고정되어 있지 않으므로 영상획득에는 렌즈교체와 초점수동조절이 필요한 산업용 CCD카메라대신 상용 디지털 카메라를 사용하였다. 사용된 카메라는 6배의 광학줌과 자동초점 기능이 있는 모델로 1200만 화소(4000×3000pixel)의 고해상도촬영이 가능하다. 카메라와 초음파 센서의 사양은 표 2와 같다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 4. 8., 채택확정 : 2008. 6. 24.

김진오 : 광운대학교 정보제어공학과(jokim@kw.ac.kr)

박동진 : (주)로봇앤디자인(djbob@md.re.kr)

※ 이 연구는 광운대학교 2006년도 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었으며 또한 도로교통연구원의 지원에 의해 연구되었음.

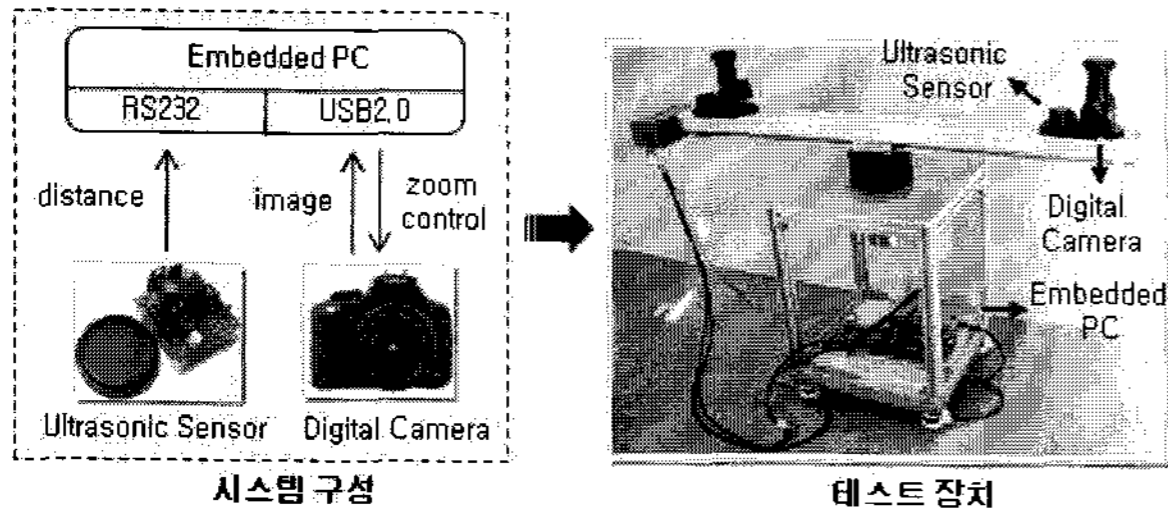


그림 1. 화상 획득 시스템.  
Fig. 1. Image acquisition system.

표 2. 화상 획득부 (카메라/초음파 거리계) 사양.

Table 2. Image acquisition system(camera/ultrasonic sensor) specification.

구분		사양	
카메라 (Powershot G9, Canon)	센서	크기	7.6×5.7 mm (1/1.7 inch CCD)
		픽셀	12.1Mega Pixels (4000×3000pixels)
	렌즈	7.4~44.4mm (6x optical zoom)	
	초점	Single /Continuous Autofocus	
	통신방식	USB 2.0 High Speed	
	영상획득속도	5 sec/image	
초음파 센서 (series 600, senscomp)	측정거리	0.15~10.7M	
	정밀도	1mm	

$$\text{Focal Length} = \left( \frac{\text{Sensor Size} \times \text{Working Distance}}{\text{Resolution} \times \text{Pixel number}} \right) \quad (1)$$

- Focal Length: 렌즈초점거리  
(카메라모델에 따라서 줌배율로 환산가능)
- Sensor Size: CCD 센서크기(mm)
- Working Distance: 카메라와 측정대상 사이의 거리

IV. 균열검출 및 두께측정

균열은 주변보다 어두운 값을 가진 점들의 집합으로 정의할 수 있다. Chen, L.C는 이러한 균열의 특성을 이용해 사용자가 검출기준점(seed point)을 입력하면 주변 영역의 어두운 점들을 추적하면서 두께를 검출하는 알고리즘을 제안하였다 [4]. 본 연구에서는 기존의 균열검출 방식에 균열진행방향 탐색 알고리즘과 B-Spline 보간함수를 사용하여 노이즈에 강인하면서 측정 정밀도를 높일 수 있는 방법을 제안하였으며, Bezier curve를 이용하여 최종 표시되는 균열의 형태를 실제 균열과 유사하게 표현하도록 하였다. 균열검출 순서도와 각 단계별 과정은 그림 2,3과 같다.

1. 검출 기준점(seed point)입력 & 다음 균열검출위치 탐색

균열검출의 첫 단계인 영역 설정은 균열의 시작점과 끝점의 입력으로 이루어진다. 입력이 완료되면 두 점을 잇는 기준선을 설정한 뒤 이 기준선을 따라 이동하며 법선 방향으로 가장 어두운 픽셀을 탐색한다. 탐색이 완료되면 이 픽셀이 다시 시작점으로 설정되며 다음 균열검출을 시작하는 위치

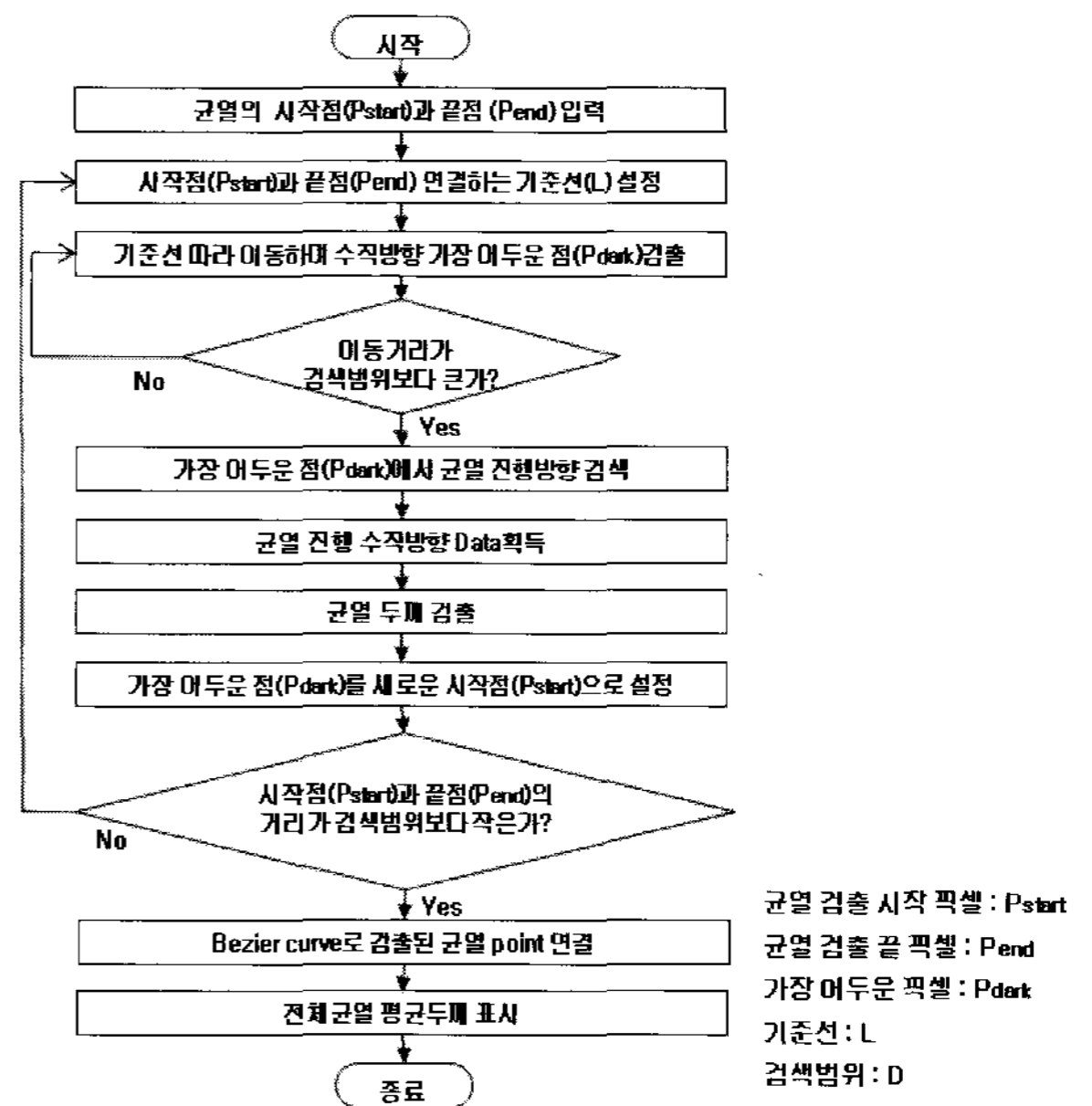


그림 2. 균열검출 알고리즘 순서도.  
Fig. 2. Flow chart of crack detection algorithm.

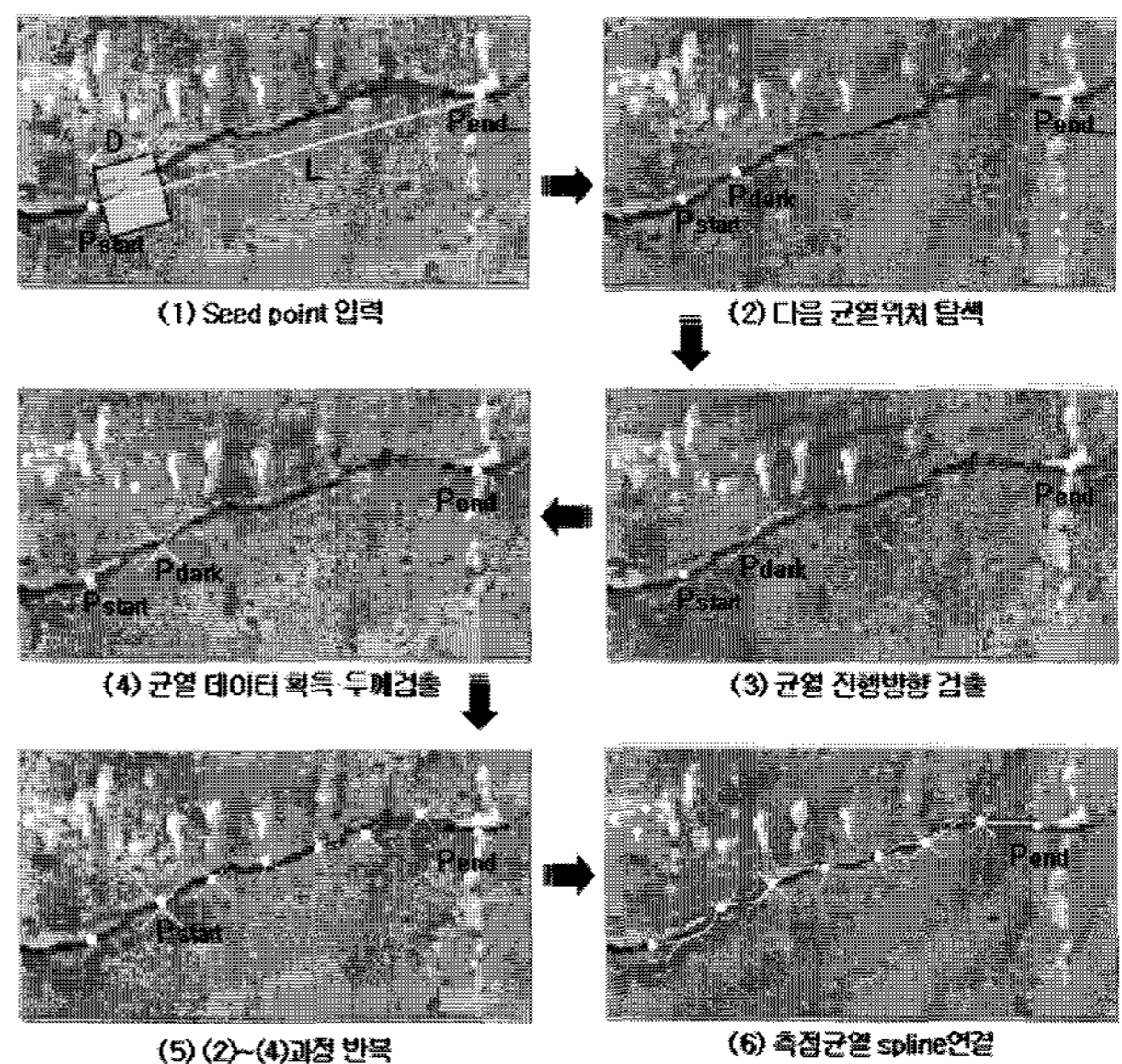


그림 3. 균열검출 과정.  
Fig. 3. Procedure of crack detection.

가 된다. 이 때 탐색범위는 표 1의 균열평가기준에 따라 충분한 검색범위인 ±10pixel(±1mm)로 설정하였다.

2. 균열 진행방향 검출

균열의 두께는 균열 진행방향의 수직방향으로 측정해야 정확한 두께를 계산할 수 있다. 기존의 균열추적 알고리즘에서는 시작점과 끝점을 잇는 선의 수직방향만으로 균열의 두께를 검출하였기 때문에 정확한 균열방향을 계산하기가 어려웠다. 본 논문에서는 균열검출이 이루어지는 픽셀을 중심으로 균열의 진행방향을 찾는 작업을 수행함으로써 이러한 단점을 보완하였다. 균열 진행방향은 그림 4와 같이 중심점 주변 픽셀을 360도 회전시키며 가장 어두운 평균 명도값을 갖는 직선구간으로 설정하였다.

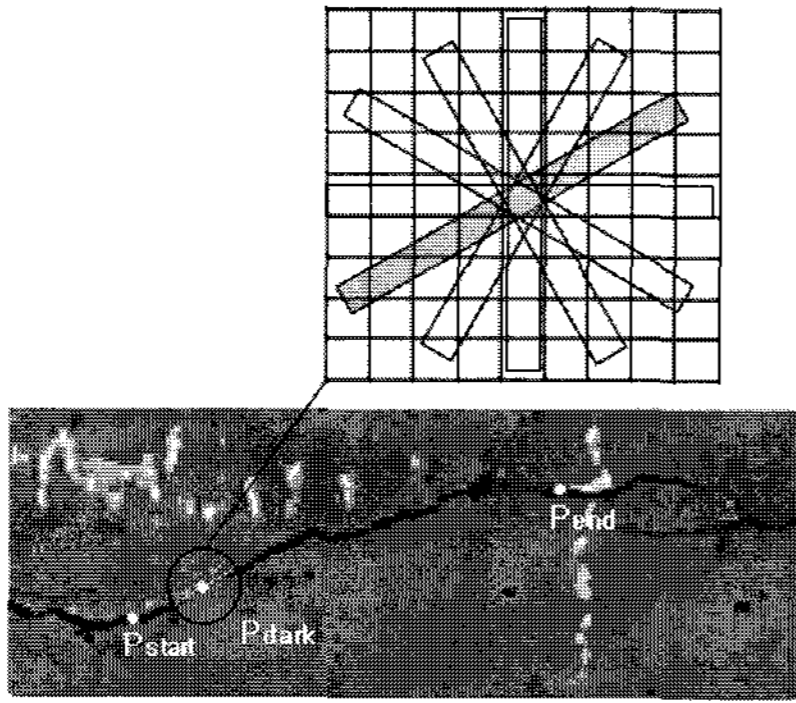


그림 4. 균열 진행방향 검출.  
Fig. 4. Detection of crack direction.

3. 균열 데이터 획득

균열 진행방향의 수직방향 데이터는 B-Spline 보간함수를 이용하여 부화소(subpixel) 정밀도로 획득하였다(수식 2). 보간에 사용된 B-Spline함수는 저대역 통과필터(low pass filter)의 역할을 수행하여 측정시 균열 주변에 분포하는 가우시안 노이즈에 강인한 특성을 갖도록 해준다[5].

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}|x|^3 - |x|^2 + \frac{2}{3} & (0 \leq |x| \leq 1) \\ -\frac{1}{6}|x|^3 - |x|^2 - 2|x| + \frac{4}{3} & (1 \leq |x| \leq 2) \\ 0 & (2 \leq |x|) \end{cases} \quad (2)$$

4. 균열 두께측정

균열의 두께는 미분 연산자를 이용하여 계산하였다. 균열은 통상 주변에 점이나 얇은 선과 같은 형태가 많이 분포하기 때문에 2차 미분연산을 사용할 경우 이러한 노이즈에 강하게 반응하여 정확한 측정결과를 얻기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 분명한 윤곽선 형태에 응답이 뛰어난 1차 미분연산을 사용하여 균열을 측정하였다. 이때 균열의 두께는 그림 5와 같이 균열의 수직방향 명도값을 추출한 뒤 밝기값의 변화율이 가장 큰 값과 가장 작은 값 사이의 거리로 계산이 가능하다[2].

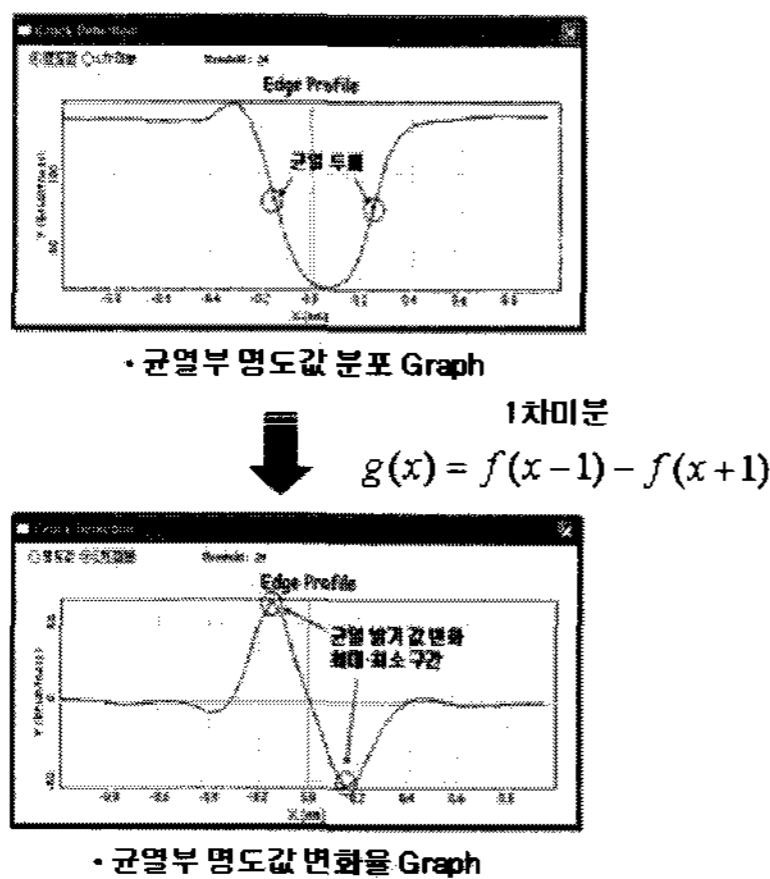


그림 5. 1차 미분을 이용한 균열 두께측정.  
Fig. 5. Width determination by using differential edge detection.

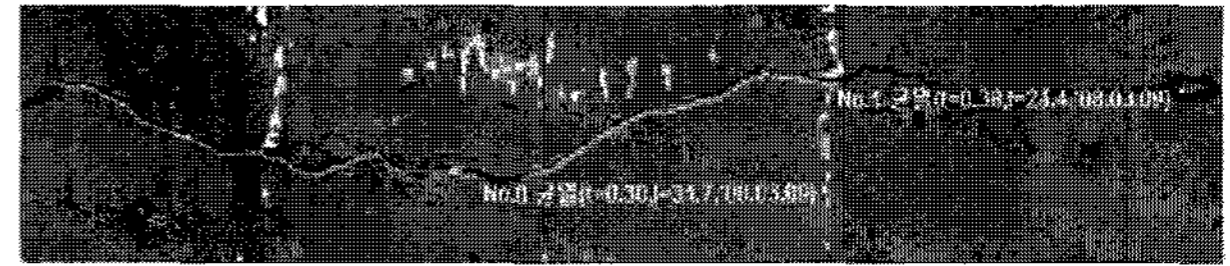


그림 6. 검출 균열의 표시.  
Fig. 6. Representation detected crack.

5. 검출된 균열표시

교량 안전평가 작업은 균열의 평균 두께와 길이로 판단되므로 추적이 완료된 개별 들은 하나의 균열로 연결되어 전체 길이와 평균두께를 측정하게 된다.

검출된 각 균열상의 점들은 Bezier curve를 이용하여 실제 균열과 유사한 형태의 부드러운 곡선으로 표현이 가능하다 [6]. 그림 6은 콘크리트면의 균열에 해당 알고리즘을 이용하여 균열을 추적하고 표시한 결과이다. 최종적으로 표시되는 균열의 두께는 검출된 각각의 균열두께 값들에 미디언 필터(median filter)를 적용하여 너무 가늘거나 굵은 특정부위의 값을 제거함으로써 정확한 평균두께를 나타낼 수 있도록 하였다.

V. 실험결과

1. 캘리브레이션(calibration) 패널의 제작

영상획득시스템과 균열검출알고리즘의 정확한 성능을 판정 하기 위해 가상 균열이 있는 캘리브레이션(calibration) 판넬을 제작 하였다(그림 7). 판넬의 인쇄정밀도는 측정정밀도인 0.1mm보다 높아야 하므로 2400dpi (1inch당 표현되는 점의 개수 2400개)의 레이저 프린터를 이용하여 약 10.6um의 정밀도로 제작하였다. 가상균열은 0.1mm씩 두꺼워지는 수평선 · 수직선 · 대각선으로 구성함으로써 다양한 두께와 형태의 균열을 테스트 할 수 있도록 하였다.

2. 실험결과

캘리브레이션(calibration)판넬의 영상은 측정거리 3M에서 5배줌(Lens 초점거리: 36.8mm)으로 획득하였으며 이때의 영상 획득정밀도는 0.15mm, FOV는 약 620×425mm이다.

테스트 결과 수평방향은 0.2mm가상균열을 대상으로 측정시 0.05mm의 측정 오차를 보였으며(그림 8), 대각방향은 0.03mm(그림 9), 대각방향은 0.04mm(그림 10)의 측정오차를 보였다.

캘리브레이션(calibration)판넬의 테스트와 동일한 측정환경에서는 0.3mm의 실측균열이 있는 콘크리트 벽면의 영상(그림 11)을 획득한 뒤 성능을 테스트하였으며 측정 시 균열부위에는 4개의 검출기준점(seed point)를 입력하여 알고리즘을 적용하였다.

각 구간의 균열측정결과는 표 4와 같다. 본 논문에서 제시한 방법을 이용해 균열의 두께와 길이가 0.05mm 이내로 비교적 정확히 계산된 것을 알 수 있다. 그림 12는 측정알고리즘의 적용결과로, 균열이 끊어지거나 희미한 부위에서도 Bezier curve가 적용되어 각 구간이 부드럽게 연결된 것을 확인할 수 있다.

현재 본 논문에서 제안한 화상획득시스템과 균열측정알고리즘은 무인 교량안전점검을 위해 개발된 교량점검로봇 UBIROS(그림 13, 14)에 장착되어 실제 교량 바닥판의 영상 획득과 균열측정작업에 사용되고 있다[7].

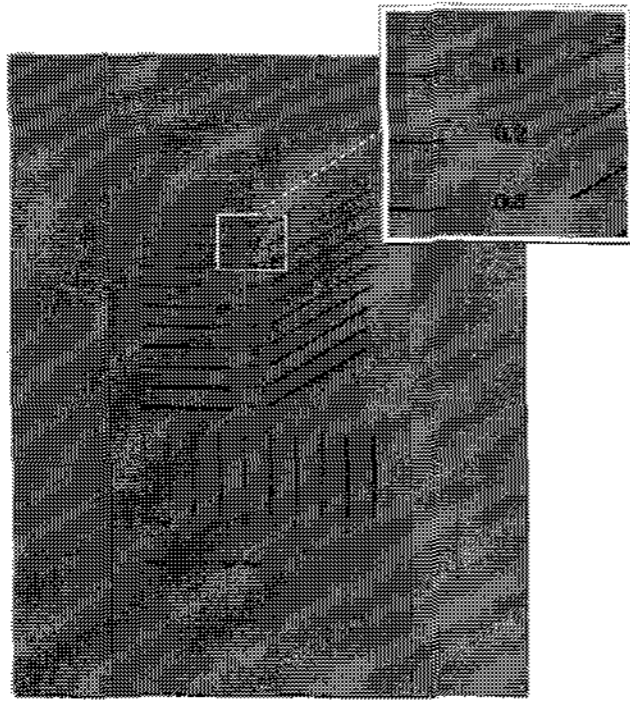


그림 7. 캘리브레이션(calibration) 판넬.  
Fig. 7. Calibration panel.

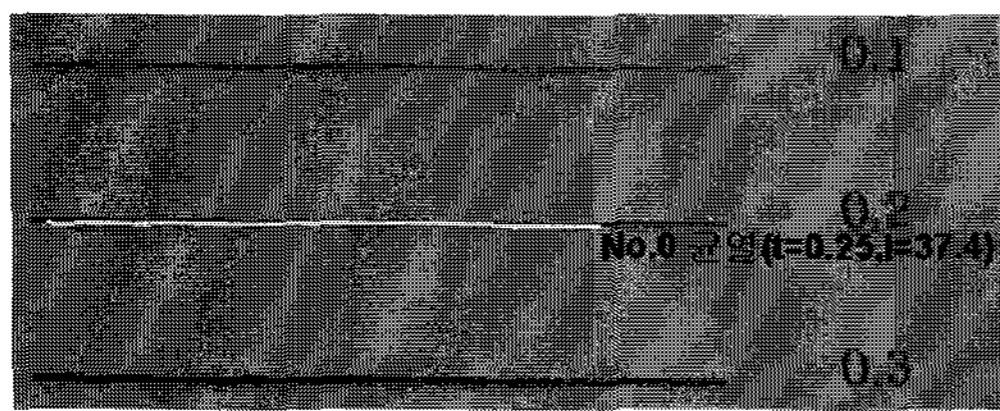


그림 8. 가로방향 균열(0.2mm) 검출결과.  
Fig. 8. Result of horizontal crack detection.

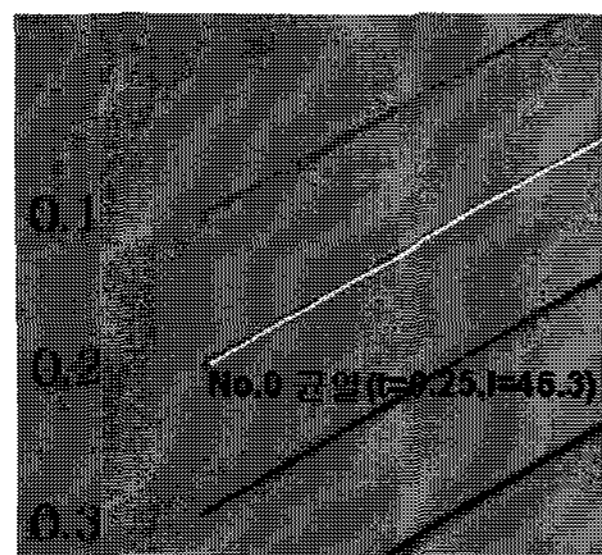


그림 9. 대각방향 균열(0.2mm) 검출결과.  
Fig. 9. Result of diagonal crack detection.

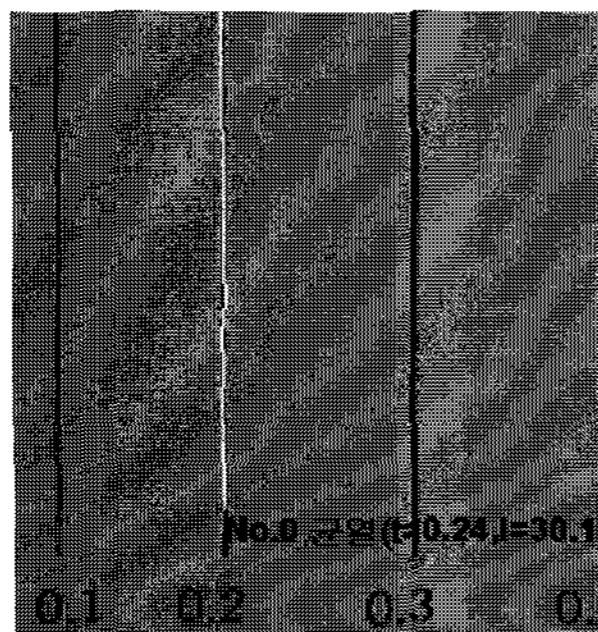


그림 10. 수직방향 균열(0.2mm) 검출결과.  
Fig. 10. Result of vertical crack detection.

표 3. 캘리브레이션(calibration) 판넬의 균열검출 사양.  
Table 3. The specification of calibration panel detection.

구분	사양
균열두께 측정범위	0.2 ~ 1.0 mm
균열 폭 검출 정밀도	±0.05mm 이내 (화상획득 정밀도 0.15mm 시)
측정 거리	1~4M

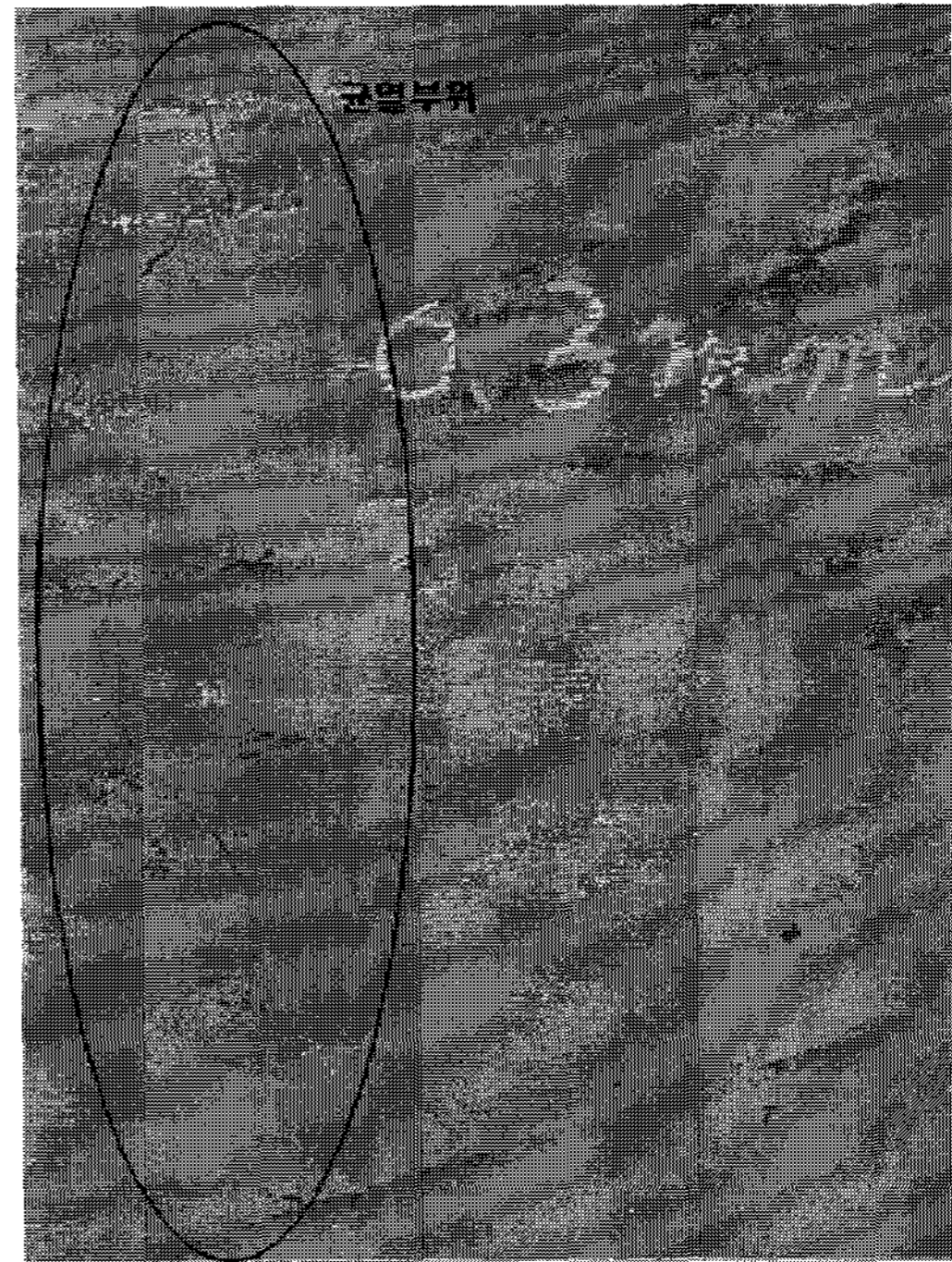


그림 11. 균열이 존재하는 콘크리트벽면 이미지.  
Fig. 11. Concrete plate with 0.3mm crack.

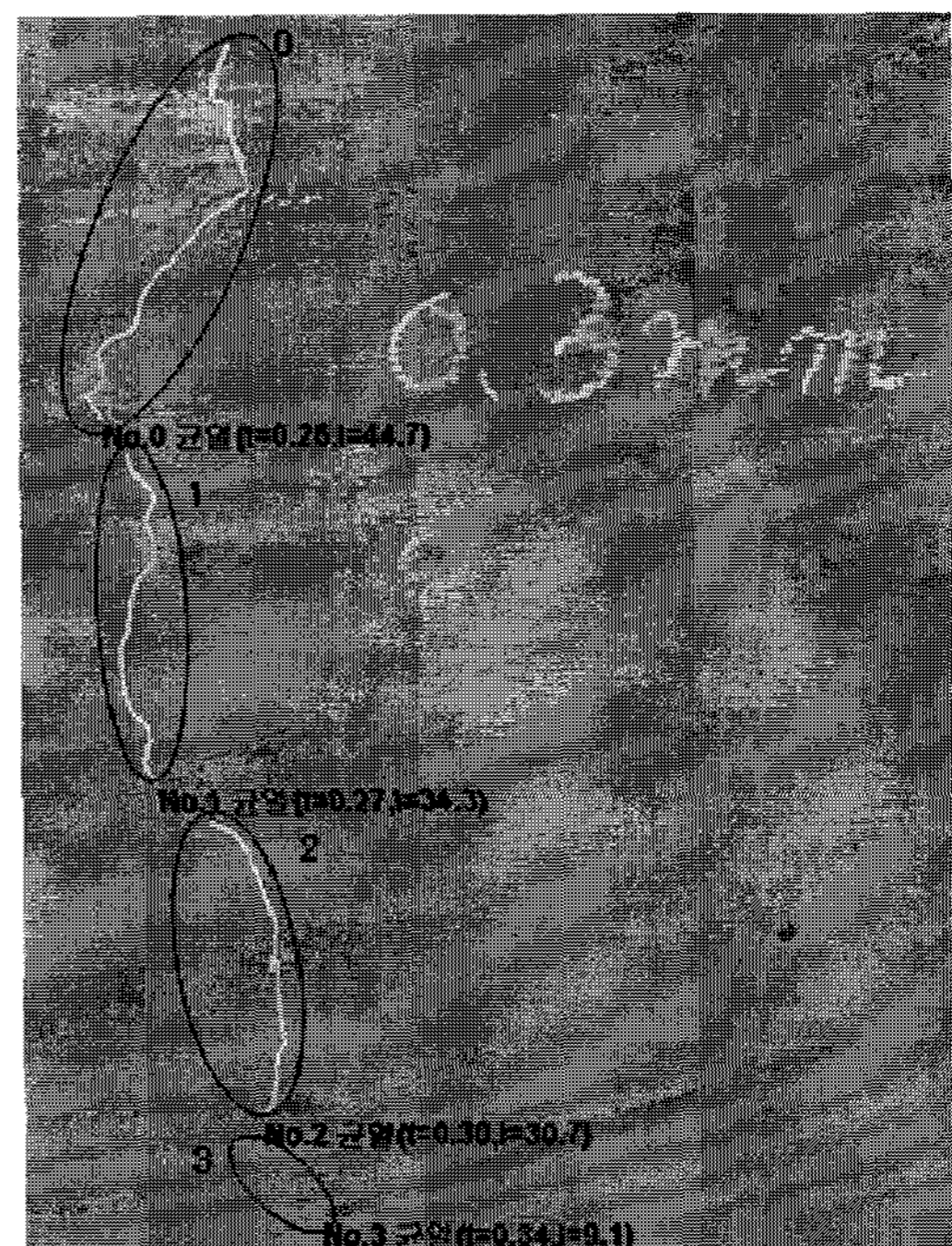


그림 12. 콘크리트벽면의 균열측정 결과.  
Fig. 12. Result of crack detection in concrete plate.

표 4. 찾아낸 균열과 그 크기.  
Table 4. Identified cracks and scale.

균열 번호	두께(mm)	길이(mm)
0	0.26	44.7
1	0.27	34.3
2	0.30	30.7
3	0.34	9.1

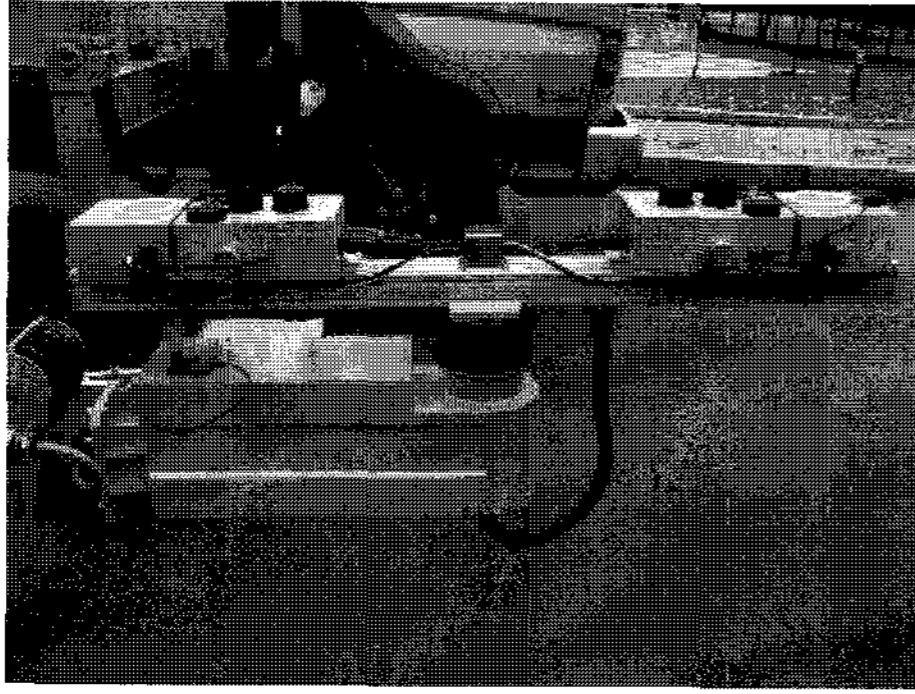


그림 13. 화상획득 시스템이 장착된 균열점검로봇 (1).

Fig. 13. Bridge inspection robot equipped with image acquisition system (1).



그림 14. 화상획득 시스템이 장착된 균열점검로봇 (2).

Fig. 14. Bridge inspection robot equipped with image acquisition system (2).

## VI. 결론

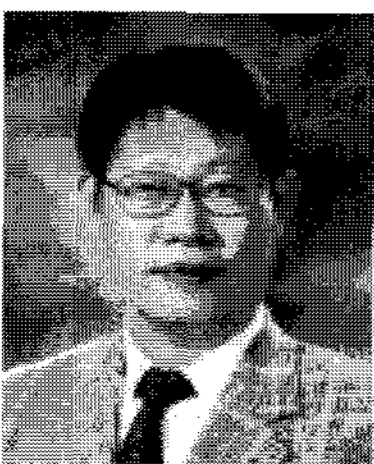
본 논문에서는 교량안전성 판단기준에 적합한 정밀도의 영상을 자동으로 획득하는 화상획득시스템을 개발하고, 획득

한 영상에서 사용자가 균열검출 기준점을 입력하면 자동으로 균열을 검출하고 두께와 길이를 계산하는 알고리즘을 연구하였다. 또한 정밀하게 출력된 가상의 균열과 실제 균열영상을 이용하여 균열검출 알고리즘의 성능을 테스트하고 그 결과를 보였다.

현재 육안으로 수행되고 있는 교량안전점검작업을 향후 본 화상획득 시스템으로 대체하기 위해서는 교량 바닥판의 미세균열 측정뿐 아니라 교량에 존재하는 백태, 파손과 같은 다양한 손상을 검출할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요할 것이다.

## 참고문헌

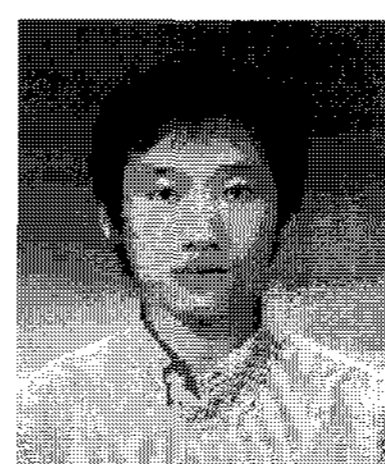
- [1] X. Feng, "Practical, interactive, and object-oriented machine vision for highway crack sealing," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 131, pp. 451-459, June 2005.
- [2] Y. Huang and B. Xu, "Automatic inspection of pavement cracking distress," *Center for Transportation Research at The University of Texas at Austin*, September 2006.
- [3] P. M. Dare, H. B. Hanley, C. S. Fraser, B. Diedel, and W. Niemeier, "An operational application of automatic feature extraction: The measurement of cracks in concrete structures," *Photogramm*, vol. 17, pp. 453-464, April 2002.
- [4] L. C. Chen and Y. C. Shao, "Measuring system for cracks in concrete using multitemporal images," *Journal of Surveying Engineering*, vol. 132, pp. 77-82, May 2006.
- [5] William K. Pratt, *Digital image Processing*, A John Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
- [6] John, C. Russ, *The image Processing Handbook*, Taylor & Francis, USA, 1989.
- [7] 이병주, 이원태, 이창근, 박창호, "무인 교량점검로봇 U-BIROS 개발," 한국구조물진단학회, 제 10 권 제 2 호, 2006.



### 김진오

서울대 기계공학과(공학사), 대학원 기계공학과(공학석사)를 졸업하였으며 미국 Carnegie-Mellon 대학교, School of Computer Science의 Robotics Program에서 박사학위를 받음. 그 후 일본에서 SECOM Intelligent Systems Lab에서 경비

로봇에 대한 연구를 수행하였고 삼성전자에서 로봇개발팀장과 로봇사업그룹장으로 근무하였다. 1999년 3월부터 광운대 정보제어공학과에서 교수로 근무 중이며, 차세대성장동력 지능형로봇 기획단장(2003년), 실무위원장(2004년~2008년)을 맡아서 국가로봇산업정책을 만드는 역할을 했으며 현재는 로봇산업정책포럼 의장, 로봇기술자격시험제도 운영위원장을 맡고 있다. 지난 15년간 약 200여종의 로봇과 시스템을 개발하여 실제 현장에 적용하였으며 30개 이상의 특허를 출원했다. 관심연구분야는 작업기반 로봇설계와 로봇의 평가기술이다. 또한 로봇을 통한 창의적 문제해결능력을 교육하는 방법에 대한 연구를 하고 있다.



### 박동진

2004년 서울산업대학교 기계설계 자동화공학부 졸업. 2006년 서울산업대학교 대학원 메카트로닉스학과 졸업(석사). 2006년~현재 (주)로봇앤디자인 첨단기술연구소 연구원. 관심분야는 머신비전, 영상처리.