

## 이미지 처리기법을 이용한 균열 측정시 스마트폰 카메라 및 렌즈 적용성에 대한 연구

### A Study on Applicability of Smartphone Camera and Lens for Concrete Crack Measurement Using Image Processing Techniques

서승환<sup>1</sup>, 김동현<sup>2</sup>, 정문경<sup>3\*</sup>

Seunghwan Seo<sup>1</sup>, Dong-Hyun Kim<sup>2</sup>, Moonkyung Chung<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Research Specialist, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT), 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

<sup>2</sup>Non-Member, CEO, AICLOPS Inc., 283 Goyangdae-ro, ilsanseo-gu, Goyang-si 10223, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Senior Research Fellow, KICT., 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Recently, high-resolution cameras in smartphones enable measurement of minute objects such as cracks in concrete using image processing techniques. The technology to investigate the crack width using an application at an adjacent distance of the close shot range has already been implemented, but the use is limited, so it is necessary to verify the usability of the high-resolution smartphone camera to measure cracks at a longer distance. This study focuses on recognizing the size of subdivided crack widths at a thickness within 1.0 mm of crack width at a distance of 2 m. In recent Android-based smartphones, an experiment was conducted focusing on the relationship between the unit pixel size, which is a measurement component, and the shooting distance, depending on the camera resolution. As a result, it was possible to confirm the necessity of a smartphone lens for the classification and quantification of microcrack widths of 0.3 mm to 1mm. The universal telecentric lens for smartphones needed to be installed in an accurate position to minimize the effect of distortion. In addition, as a result of applying a 64 MP high-resolution smartphone camera and double magnification lens, the crack width could be calculated within 2 m in pixel units, and crack widths of 0.3, 0.5, and 1mm could be distinguished.

#### 요 지

최근 스마트폰의 고해상도 카메라는 영상처리 기법을 이용하여 콘크리트 균열과 같은 미세한 피사체의 측정을 가능하게 한다. 이미 접사 범위 정도의 가까운 거리에서 어플리케이션을 이용하여 균열폭을 조사하는 기술이 구현되어있으나, 이용에 제한적 이므로 보다 먼 거리에서 균열을 측정할 수 있도록 스마트폰 고해상도 카메라의 사용성 검증이 필요하다. 본 연구는 2m 이내에서 거리에서 균열폭 1.0mm 이내의 두께에서 세분화된 균열폭들의 크기 인지에 초점을 두고 있다. 최근의 안드로이드 기반 스마트폰들을 대상으로 카메라 해상도에 따라 측정 구성요소인 단위 픽셀 크기와 촬영거리와의 관계를 중심으로 실험을 수행 하였으며, 그 결과 0.3mm 이상 1mm 이하 미세 균열폭의 구분과 정량화를 위해서 스마트폰용 렌즈의 필요성을 확인할 수 있었다. 스마트폰용 범용 텔레센트릭 렌즈는 왜곡의 영향을 최소화하기 위해서 정확한 위치에 장착이 필요하였다. 또한, 64MP 의 고해상도 스마트폰 카메라와 2배 확대렌즈를 적용한 결과 2m 이내에서 픽셀단위로 균열폭을 산정할 수 있었으며, 0.3mm, 0.5mm, 1mm 균열폭 구분이 가능하였다.

**Keywords** : Concrete crack, Image processing, Smartphone, Smartphone telephoto lens

Received 22 Nov. 2021, Revised 2 Dec. 2021, Accepted 6 Dec. 2021

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0219; Fax: +82-31-910-0561

E-mail address: mkchung@kict.re.kr (M. Chung)

## 1. 서론

스마트폰은 시설물 외관조사시 현황 촬영 및 조사 현장을 기록하는 등 작업에 활용되고 있다. 또한, 계측의 목적으로도 스마트폰의 사용 편의성을 바탕으로 가까운 거리에서 구조물의 균열 크기를 측정할 수 있도록 어플리케이션이 개발되어왔으며 상당부분 상용화 단계까지 개발된 상황이다. 이 기술은 객체 크기를 측정하기 위해 특정 크기의 기준자(Ruler)를 위치시켜 함께 촬영 이를 기준으로 측정하는 방식이다. 최근 스마트폰 고해상도 카메라의 지속적인 개발은 피사체의 정밀도에 대한 기대수준을 높이고 있다. 정밀도는 영상을 이용한 시설물의 외관조사 기술에서 매우 중요한 인자로서 정밀도가 높을수록 조사 범위를 확대하고 조사 결과의 정확성을 높일 수 있다. 육안에 의한 균열 조사의 경우 기준자를 이용하여 조사자의 시각적인 판단으로 이루어지므로 별도의 측정 장치 없이 스마트폰 이미지로 측정할 수 있다면 육안관찰 단계에서의 작업 방법을 크게 개선할 수 있을 것이다. 사용성 측면에서도, 최근 스마트폰은 컴팩트한 크기 안에 전자식, 광학식 손떨림 방지기능을 구현하여 블러링(Blurring)을 최소화한 이미지를 얻을 수 있으며 자체적으로 탑재된 위치정보 기능과 다양한 통신기반(LTE, WiFi, 5G) 기능들을 통해 현장에서 쉽게 작업 현황을 촬영하거나 기록하고 데이터를 전송할 수 있다.

하지만, 스마트폰 카메라를 균열측정에 활용하는 경우 몇 가지 해결해야 할 사항들이 있다. 우선, 스마트폰 카메라로 촬영하는 균열 피사체의 크기나 모양이 스마트폰의 기종에 따라 다른 양상을 나타낼 수 있다는 점이다. 색감이나 명도, 채도를 보정하는 소프트웨어가 스마트폰의 제조사마다 다르기 때문에 이미지처리로 균열을 특정하는 단계에서 차이를 나타낼 수 있다. Oh(2012)의 연구에서 언급된 바와 같이 국내에서 시판되는 안드로이드 카메라 기종이나 버전에 따라 촬영되는 피사체 이미지의 크기나 모양이 다르다는 사실로부터 스마트폰 기종에 따라 균열 크기 계산에 적용하는 알고리즘에 기종에 따른 스마트폰 카메라 특성이 반영되어야 할 것으로 해석된다.

또한, 최근의 스마트폰 카메라는 고해상도를 지향하나 사용자가 평가하는 스마트폰 카메라는 단순히 화소수만으로 비교하기 어렵다. 일반적인 스마트폰의 카메라는 광각렌즈를 장착하여 가까운 거리에서 빠른 자동초점 기능으로 선명한 이미지를 얻는데 주안점을 두고 있다. 따라

서, 균열 추출시 촬영거리에 따라서 스마트폰의 해상도가 높아도 스마트폰 이미지의 정밀도가 응용하는 목적에 부족할 수 있다. 일반 DSLR 카메라의 경우는 미세균열을 추출하기 위해서 고배율 렌즈를 도입하여 이러한 문제를 해결하였다. Lee et al.(2005)은 약 2m 거리에서 FL(Focal Length)가 70mm인 렌즈를 이용하여 약 0.2mm 균열을 측정하였으며, 20m 거리에서 0.2mm 균열폭을 산정하는데 초점거리 600mm 망원렌즈가 사용되기도 하였다(Lee et al., 2012). 최근에 저자는 HQ 라즈베리파이 카메라 모듈과 초점거리 12mm의 C-type 렌즈를 조합하여 3m 거리에서 0.3mm 폭의 균열을 측정하였다(Seo et al., 2020). 스마트폰의 경우 렌즈를 대신하여 스마트폰의 디지털 줌기능을 이용한 연구사례로 Ni et al.(2020)은 최대 20MP 스마트폰 카메라와 디지털 줌기능을 이용하여 약 0.8~0.9mm 균열폭을 약 1.2~2.0m 거리에서 10% 오차율로 검출한 사례가 있다.

렌즈를 이용한 카메라 이미지를 계측자료로 활용할 때 유의할 사항은 카메라 렌즈가 포함된 왜곡을 고려해야 한다는 점이다(Jeong et al., 2008). 특히 스마트폰의 경우 기종별 전용 렌즈가 없으며 범용 렌즈를 이용하는 경우 스마트폰 기종별 카메라의 외관이나 설치 위치가 달라 촬영시 렌즈장착 상태에 따른 미세한 차이가 발생하여 왜곡의 원인이 된다. 이러한 왜곡 오차를 최소화하기 위해 장치적 보완이 필요하며 별도의 캘리브레이션(Calibration)이 필요하다. 최근의 스마트폰 카메라의 성능은 현격히 높아지고 있으며 스마트폰 카메라를 DSLR 카메라의 기능과 같이 고품질 영상 이용을 극대화 하기 위한 렌즈기술 등도 개발되고 있으나 이러한 스마트폰 카메라와 렌즈의 조합에 대한 영향을 과학적으로 검증하는 연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 최근 고해상도 스마트폰 카메라와 단초점 망원렌즈를 이용하여 육안관찰 거리인 2m 이내에서 균열폭 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm 균열폭을 특정할 수 있는지 여부에 주안점을 두었다. 최근 시판되는 안드로이드 기반 스마트폰을 이용하여 카메라 해상도와 촬영거리를 변수로 실험을 수행하였다. 저자는 기존 연구에서 약 3.0m 거리에서 0.3mm 균열폭을 산출하기 위한 목적으로 휴대용 장치를 개발한 바 있다. 본 연구는 최신 스마트폰 카메라를 이용하여 이와 유사한 결과를 얻을 수 있는지에 대한 실험적 연구이다. 영상처리기법을 이용한 균열 추출은 모폴로지(Morphology) 기법을 적용하였다(Tanaka et al., 1998;

Zhang et al., 2014). 추출된 균열은 피사체의 크기를 측정하기 위해서 모폴로지 기법을 이용하여 단위 픽셀 크기를 산정하여 계산하였으며, 저자가 앞선 연구에서 제안한 픽셀 감소계수를 활용하여 균열 보정 알고리즘(Seo et al., 2020)을 토대로 계산하였다.

## 2. 균열 이미지 검출 및 정량화 방법

균열 검출과정 알고리즘은 기본적으로 Lee et al.(2005)이 제시한 절차를 참고하여 다양한 모폴로지 기법(Otsu, 1979; Sonka et al., 2015)을 적용하였다. 균열 이미지 검출은 다음과 같은 순서로 수행하였다. 촬영한 원본 영상은 그레이스케일로 변환하고 빛의 영향을 제거하기 위해 Closing 연산을 수행한 후 차분 영상을 구한다. 이 방법은 콘크리트 면에 비치는 빛의 영향을 보정하여 조도가 부족한 경우 균열 검출에 적합한 기법이다. 이후 균열검출 단계에서 전역적 이진화(Binarization) 작업을 수행하고 Otsu의 판별 함수(Otsu, 1979)를 적용하였다. 이 단계에서는 이진화된 영상에 3×3필터를 적용하여 첫 번째 단계의 노이즈 제거를 진행하였으며 이후 노이즈가 줄어든 영상에 Labeling을 진행하고 각 Label 영역에 형상분석을 통해 균열 형상이 아닌 폐쇄형 객체에 대한 노이즈를 제거하였다. 이 과정을 통해 균열을 보다 명확하게 구분할 수 있었다. 이후 노이즈가 제거된 영상에 균열의 골격이 되는 중심선에 대한 화소만 남기는 세션화(Thinning) 단계를 진행하였다. 세션화 영상은 균열의 진행방향과 분기점 분석에 사용된다. 전체 알고리즘 개요도는 Fig. 1과 같다.

균열 크기를 산정하는 방법은 윤곽선 기법(Boundary)을 이용해서 검출된 가장자리의 폭을 이용해서 산정하였

다. 균열폭을 산정하는 방법으로 대표적인 방법은 균열의 가장자리 선에 접하는 내접원을 이용하는 방법(Doihara et al., 1993)이 있으며, 국내에서는 사각형 마스크 방법으로 윤곽선 영상을 이용해서 균열폭을 산정한 사례가 있다(Lee et al., 2005). 본 연구에서는 연산 과정을 단순화하여 계산 시간을 줄일 수 있도록 원본 이미지에서 얻어진 균열 폭을 직접 이미지로부터 계산할 수 있는 원형 마스크를 이용하는 방법을 적용하였다. 균열 길이와 폭은 구성하고 있는 픽셀 개수를 기준으로 계산되며, 촬영 거리와 광학 함수관계를 나타내는 식 (1)을 이용하여 실제 균열 크기를 추정할 수 있다.

$$S = \left[ \frac{FL}{WD} \times \frac{SR}{SS} \times CS \right] \quad (1)$$

여기서, S는 구성요소의 크기(pixel), WD는 카메라와 객체와의 거리(m), FL은 렌즈 초점 거리(mm), SS는 카메라 센서 사이즈(mm), SR은 카메라 센서 해상도(pixel)이고 CS는 균열 크기이다.

## 3. 실내 시험

### 3.1 실험 방법

스마트폰 카메라를 이용한 균열검출 특징 분석을 위해서 실내실험을 수행하였다. 촬영에 사용된 피사체는 이미지 월(Wall) 형태로 제작하였으며 AutoCAD를 이용해서 균열 모양을 임의로 콘크리트 표면 패턴 이미지 위에 그려서 전체 크기를 570mm×420mm로 만들었으며, 일정 균열 폭( $t=0.1\text{mm}, 0.3\text{mm}, 0.5\text{mm}, 1.0\text{mm}$ )으로 출력하여 포맥스 재질의 촬영판에 부착하여 사용하였다(Fig. 2). 동일한 폭을 가진 균열을 표현하고 균열 길이를 정확하게 산정하기 위해 본 연구에서는 AutoCAD를 사용하여 균열 샘플을 제작하였다. 하지만 AutoCAD 도면을 인쇄하는 경우 인쇄기의 해상도 등에 따라 설정한 두께와 실제 출력되는 결과물의 두께가 다를 수 있으므로 설정한 값과 실제 출력물의 값을 비교할 필요가 있다. 본 연구에서 도면에서 설정한 균열폭 0.1mm, 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm는 출력 시 각각 0.12mm, 0.32mm, 0.51mm, 1.0mm로 인쇄되었으며, 인쇄물에 대한 오차율은 미미한 것으로 판단되었다. 실험은 피사체의 정면에서 스마트폰을 이용하여 1m, 2m, 3m

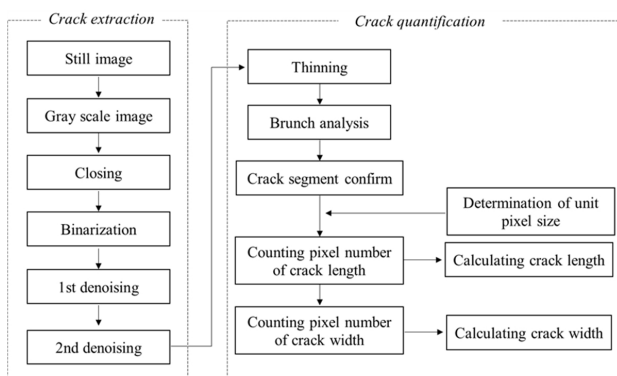


Fig. 1. Algorithm of measuring crack (Seo et al., 2020)

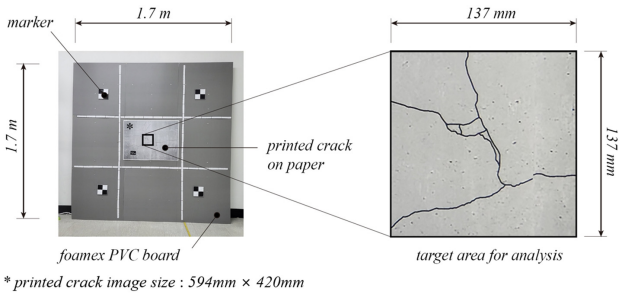


Fig. 2. Configuration of test board and target area for analysis

거리에서 촬영하였다. 실내 실험은 약 500lx로 동일한 조명 환경에서 진행하였으며, 촬영판의 정면에서 삼각대에 스마트폰을 거치하고 촬영하였다. 스마트폰 기종마다 카메라의 위치가 조금씩 바뀌지만 이에 대한 정밀한 조정은 하지 않고, 사용자가 현장에서 휴대폰을 사용할 때를 고려하여 촬영각도에 대해 엄격하게 제어하지 않고 가급적 정면을 향하여 촬영하였다. 실험에 사용된 스마트폰은 최근 스마트폰 기종중 카메라 해상도를 고려하여 3개의 기종을 선별하였으며 이중 최신기종의 스마트폰은 고해상(HD)모드와 일반모드(Normal)로 나누어 진행하였다. 또한, 렌즈 적용성 검토를 위하여 스마트폰 전용렌즈를 적용하였다. 본 연구에서 적용한 렌즈는 스마트폰 전용 망원렌즈 중에서 배율보다는 사진의 왜곡이 적은 약 2배율의 확대기능을 갖춘 렌즈를 적용하였다. 망원렌즈를 적용하는 경우 렌즈 곡률에 의한 왜곡 영향을 받을 수 있으나 본 연구에서

는 왜곡보정을 별도로 진행하지 않았다. 카메라 왜곡은 스마트폰의 카메라 모듈과 적용한 렌즈와의 조합에 따른 장치 특성이 반영되어 나타나는 것으로 본 연구범위에는 포함시키지 않았다. 렌즈에 의한 왜곡은 촬영 중심부일수록 영향이 적어지므로 왜곡 영향을 최소화하기 위해 이미지 처리 시 원본 이미지에서 촬영 중심부에 위치한 균열 부위의 정사각형 영역을 선택하여 이미지 프로세싱을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 스마트폰 카메라 모듈은 Table 1에 정리하였다. 카메라 해상도는 해상도 순서로 삼성전자의 갤럭시 퀴텀2(이후 GQ2), 갤럭시 와이드(이후 GW) 기종과, 엘지전자의 엑스파워(이후 LG) 기종으로 해상도는 64MP, 16MP, 12MP, 10MP 순이며 GQ2 기종의 경우 HQ 모드와 Normal 모드를 구분하여 적용하였다. 적용한 스마트폰 전용 렌즈는 Moment사의 등가초점거리 58mm 렌즈로서 직경 39.5mm의 크기의 렌즈로서 스마트폰 장착 시 별도의 고정장치가 필요한 모델이다. 따라서, 스마트폰의 렌즈 위치에 맞는 고정장치를 설계하여 3D 프린팅을 통해 고정홀더를 제작하였다(Fig. 3).

### 3.2 이미지 수집 및 분석

본 절에서는 실제로 스마트폰 카메라를 이용하여 사진을 촬영하고 촬영된 이미지를 균열 처리 알고리즘을 이용

Table 1. Specifications of test smartphones and lens

	Device	Galaxy Quantum2 (GQ2)		Galaxy Wide4 (GW)	LG-F750K (LG)
		HQ	Normal		
Smartphones	manufacturer	Samsung	Samsung	Samsung	LG
	System version	android 11,0	android 11,0	android 9,0	android 6,0
	camera resolutions	64MP	16MP	12MP	10MP
	sensor size (pixels)	9,248×6,936	4,624×3,468	4,128×3,096	4,160×2,336
Lens	Specs	Moment, 58 mm, Aperture F/1.8, distortion < 0,75%			-
	FOV (H)	2X optical zoom, ave. 38,0° depending on phone model			-



Fig. 3. 3D printed lens holder for smartphone (GW)

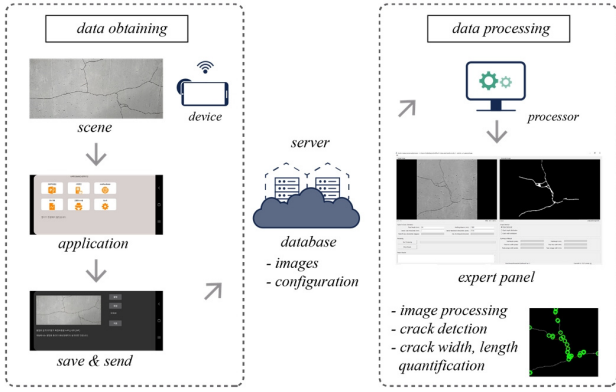


Fig. 4. Crack measurement procedure using smartphone image

하여 계산하는 과정을 설명한다. 스마트폰의 장점은 촬영이 용이하다는 점뿐만 아니라 네트워킹이 가능하다는 점이다. 촬영한 이미지를 서버로 전송하고 피드백을 받을 수 있는 양방향 커뮤니케이션 매체로 서버를 이용한 기기로 적합하다. 저자는 스마트폰 기반의 균열측정을 위해서 보다 간편하게 측정, 분석, 유지관리에 활용하는 영상기반 측정 시스템 개발을 수행하고 있으며 본 연구에서 실험 이미지의 전송과 분석에 시스템 기능을 활용하였다. 본 시스템을 통한 이미지처리 순서는 Fig. 1과 같다. 우선, 스마트폰을 이용해 획득한 영상은 영상계측 서버의 특정 폴더에 저장된다. 저장된 원본 이미지는 이미지 처리영역을 Adobe Photoshop 프로그램을 이용하여 잘라내는 과정을 거치고 잘라낸 이미지는 영상계측 서버에 설치된 영상분석 대시보드 프로그램을 이용하여 2절에서 언급한 이미지 처리 알고리즘을 실행하였다. 단계별 이미지 처리 과정에서의 영상 데이터를 확인할 수 있도록 기능을 설정하였다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 균열 검출

1m, 2m, 3m 거리에서 샘플의 정면 사진을 촬영하고 전송한 과정을 거쳐 균열 검출을 수행하였다. 전체적으로 2m 이내의 거리에서 촬영한 이미지는 균열 형태에 대한 추출은 높은 식별성을 나타내었다. 반면에 정밀도를 고려하면 렌즈 미적용 기종을 포함해서 단위 픽셀크기가 상대적으로 큰 경우 추출된 균열폭이 커서 서로 겹치는 현상을 나타내었다(Fig. 5). 또한, 3m 거리에서는 일부 GQ2 기종과 렌즈를 같이 사용한 경우에 제한적으로 균열을 추출하

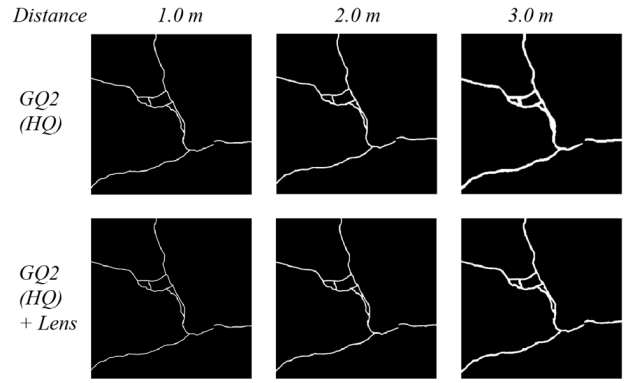


Fig. 5. Comparison of binary images after 2<sup>nd</sup> denoising stage (crack width=0.5 mm)

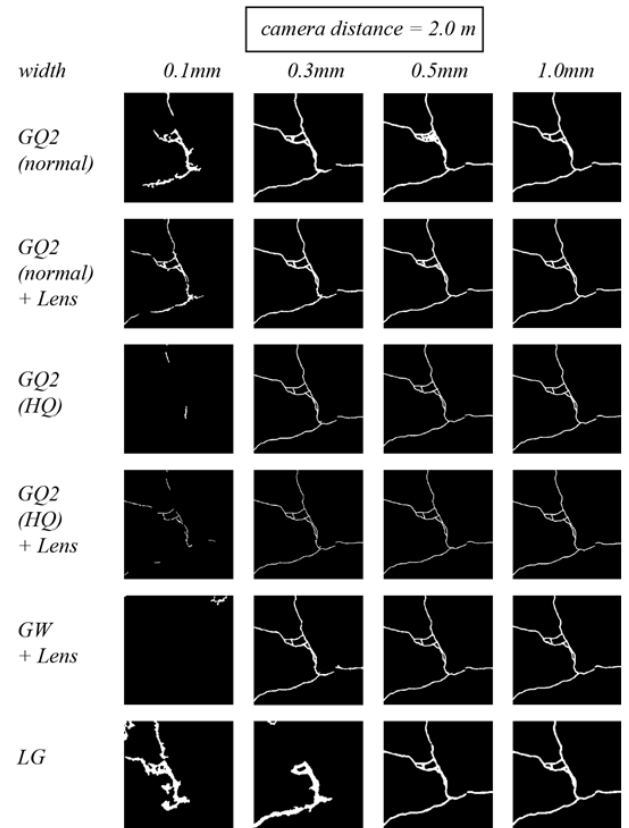


Fig. 6. Comparison of binary images after 2<sup>nd</sup> denoising stage for test smartphone cameras (distance=2.0 m)

였으나 대부분 거리에 따른 픽셀 크기 증가로 전체 균열 형태를 제대로 검출하지 못하였다. Fig. 6은 2m 거리에서 각 스마트폰 이미지에서 노이즈 제거후 균열을 검출한 이진화 영상을 나타낸다. 여기서, 0.1mm 폭의 균열의 경우 대부분 균열 검출에 오류를 포함하고 있다. 이 결과는 0.1mm 균열폭을 구성하는 픽셀수의 부족에 기인하여 2절에 설명한 균열 구분 단계를 거치면서 나타나는 오류로 해석된다. 또한, 미세한 균열일수록 촬영시 균열선 가장자리

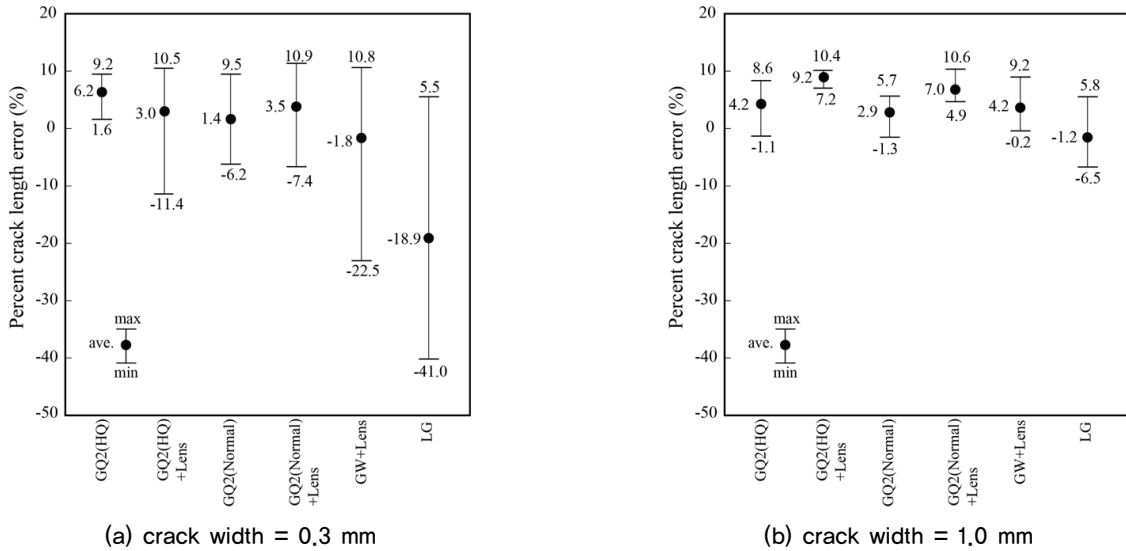


Fig. 7. Results of crack length estimation

의 블러링(Blurring) 영향을 크게 받을 것으로 판단되며 또한, 주변 콘크리트 이미지의 검은점과 균열선이 겹쳐서 왜곡된 형태의 상을 나타내는 것으로 해석된다. 이러한 왜곡 현상은 렌즈를 적용한 고해상도 스마트폰 카메라(GQ2)로 촬영한 이미지에서 상대적으로 작게 나타났다.

#### 4.2 균열 길이

이미지 처리 결과를 이용하여 계산된 균열 길이의 정확도를 평가하였다. 실제 균열 길이는 실제 스케일로 불러온 원본 이미지를 이용해서 AutoCAD상에서 이미지 위에 균열선을 따라 그린 선을 측정하였으며 2절에서 설명한 방법에 의해 이미지 처리후 단위픽셀 크기를 기준으로 계산된 값과 비교하였다. 균열 길이의 정확도는 결과적으로 균열 추출율과 비례한다. 본 연구에서 균열 길이에 영향을 주는 요소는 이미지 처리로부터 균열을 뚜렷하게 식별할 수 있는지 여부와 픽셀 크기 부족으로 발생하는 왜곡(겹친 돌출부를 균열로 인식하는 노이즈의 영향)의 정도로 해석할 수 있다. 비교 결과, 균열 추출의 식별도가 높을수록 실제 균열 길이에 근접한 계산값을 나타내었다. Fig. 7은 각 거리에서 촬영한 이미지를 이용하여 산출한 결과를 0.3mm 균열폭과 1.0mm 균열폭에 대해서 비교한 그림이다. 균열폭이 작은 0.3mm 균열은 거리가 멀수록 식별도가 낮아 길이 오차가 크고 실제값보다 적게 산출되어 거리에 따른 편차가 큰 반면 균열 폭이 넓은 1.0mm 균열의 경우 상대적으로 거리에 따른 식별도는 크지 않으며 최대값과

최소값의 차이는 약 10% 내외의 오차율을 나타내었다. 상대적으로 작은 오차 범위를 나타낸 기종은 렌즈가 적용된 기종으로 GQ2(HQ)+Lens는 7.2%~10.4%, GQ2(Normal)+Lens는 4.9%~10.6%의 오차율을 나타내었다. 이미지 처리결과 평균값의 범위가 -1.2%~10.6% 로서 실제값에 비해 크게 산정된 원인으로는 산정 방법의 차이로서 계산에 적용한 알고리즘은 각 픽셀 단위의 미세 분할값을 더하여 산정하는 반면 측정값은 AutoCAD 상 임의로 그린 선의 길이의 합을 반영하고 있어 이미지 처리에 의한 값이 더 큰 것으로 해석된다.

#### 4.3 균열폭

본 연구에서 사용하고 있는 모폴로지 기법을 바탕으로 균열폭을 측정하기 위해서 카메라와 피사체 간의 거리가 만드는 단위 픽셀 크기를 우선 검토해야 한다. 앞서 서술한 바와 같이 일반적인 스마트폰 카메라는 광각렌즈를 적용하므로 촬영 거리가 멀어질수록 모폴로지 기법으로 균열과 같은 미세한 선의 두께를 파악하는데 적합하지 않다. 실제로, 실험결과 균열폭의 경우 1m와 2m 촬영 거리의 이미지로부터 실험에 사용된 0.1mm, 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm 균열폭을 픽셀 단위로 뚜렷하게 구분하는것은 제한적이였다. Fig. 8은 이미지 처리결과 균열폭에 따라 계산된 픽셀 수를 표시한다. 가장 해상도가 낮은 LG 기종의 경우 균열 폭에 따른 픽셀수의 변화가 거의 없다. 이 경우 1mm 이내의 범위에서 서로 다른 균열폭을 특정하는 것은 거의 불가



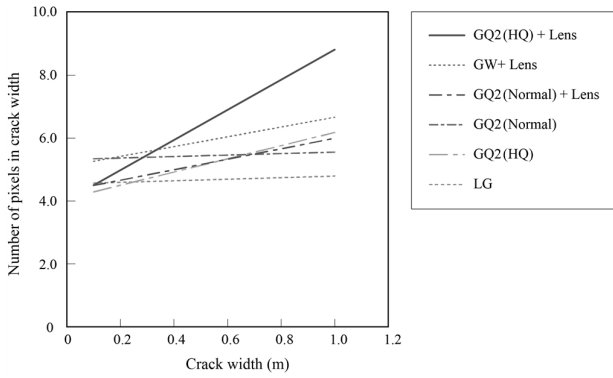


Fig. 8. Distribution of number of pixels in crack width vs. measured crack width

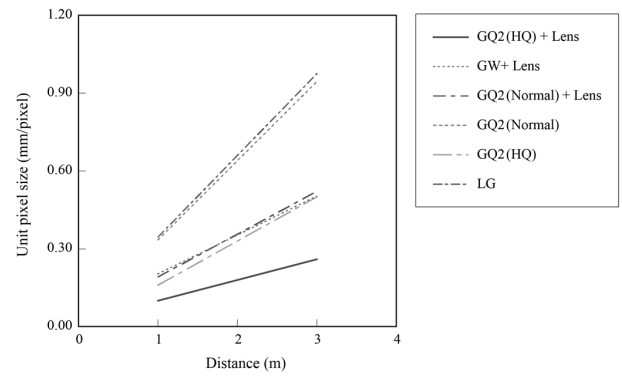


Fig. 9. Distribution of unit pixel size with different shooting distance

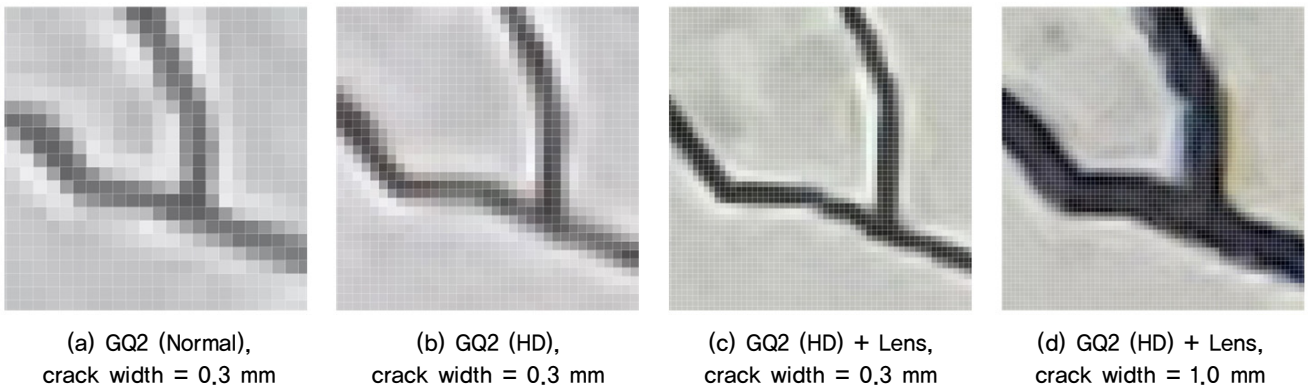


Fig. 10. Zoomed views of captured images obtained from GQ2 smartphone in 1 meter distance ((a), (b), (c) crack width=0.3 mm, (d) crack width=1.0 mm)

능하다. 반면에, 렌즈를 적용한 기종의 경우 균열폭이 커지면서 해당 픽셀수도 증가하는 경향을 보이고 있다. 가장 해상도가 높은 GQ2(HD) 기종에 렌즈를 적용한 경우 1m 거리에서 0.3mm에 대한 픽셀수는 5.2, 0.5mm 일 때 6.2, 1.0mm의 픽셀수는 8.9로 증가 경향은 상당히 뚜렷하다. 이 경향은 2m 거리에서도 유사하다. 따라서, 2m 이내에서 0.3mm 균열폭 특성은 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 9는 렌즈의 적용성을 단위 픽셀크기로 설명한 그림이다. 렌즈를 적용하지 않은 LG, GQ2(Normal)모델의 경우 단위픽셀 크기가 가장 크고 2배율 렌즈를 적용한 경우 단위 픽셀 크기는 이분의 일로 감소함을 알 수 있다. 가장 해상도가 높은 GQ2(HD) 기종에 렌즈를 적용한 경우는 저자의 기존 연구에서 라즈베리 파이 HQ 카메라 모듈 (12MP) 과 C-type렌즈(FL=12mm)를 적용한 경우와 유사한 단위 픽셀 크기를 보였다. Fig. 10에 실제 이미지상에서 균열 피사체의 픽셀 분포를 보여주고 있다. GQ2 기종을 이용하여 1m 거리에서 촬영한 이미지로부터 0.3mm 균열 추출시 16MP (Normal)과 64MP (HQ)간에 해상도에 기인

하여 두배 정도의 픽셀수 차이를 나타내고 있으며(Fig. 10(a), (b)), HQ 모듈에 렌즈를 적용하였을 때 약 두 배의 픽셀수 증가를 나타내었다(Fig. 10(b), (c)).

Fig. 10과 같이 노이즈를 없앤 이미지에 원형 마스크를 적용하여 균열폭을 산정하였다. Table 3에 보이는 바와 같이 균열 길이에서 생긴 오차에 비해 큰 오차 범위를 나타낸다. 오차율은 해당 균열폭이 작을수록, 촬영 거리가 멀수록, 단위픽셀 크기가 클수록 크게 산정되었다. 균열 식별이 불량한 0.1mm 폭을 제외하고 0.3mm 폭의 균열폭 계산값은 전 기종에서 과대평가 되었으며 렌즈를 적용한 GQ2 기종에서 93%~134% 범위로 오차가 비교적 작았다. 이러한 과대평가의 원인은 전절에 언급한 것처럼 blurring 영향으로 Otsu방법에 의해 균열 추출시 균열 중심선으로 부터 바깥쪽 방향으로 음영 차이가 적은 주변 영역까지 균열 영역으로 포함하는 영향이 큰 것으로 판단된다. 반면에, 균열폭 1.0mm에 대해서 전체적으로 과소평가하는 경향을 나타내고 있다. 과소평가폭은 단위픽셀 크기가 작을수록 감소한다. 렌즈를 적용한 GQ2(HQ)+Lens의

Table 3. Comparison of estimated crack widths obtained by smart phone images at distances of 1 and 2 m

Smart phones	Estimated crack width at distance of 1 m			Estimated crack width at distance of 2 m		
	0.3 mm	0.5 mm	1.0 mm	0.3 mm	0.5 mm	1.0 mm
GQ2, (HQ) + Lens	0.4 (134)	0.53 (106)	0.92 (92)	0.46 (154)	0.55 (110)	0.74 (74)
GQ2, (Normal) + Lens	0.28 (93)	0.46 (92)	0.62 (61)	0.63 (210)	0.59 (119)	0.56 (56)
GW + Lens	0.55 (182)	0.66 (131)	0.70 (70)	0.65 (215)	0.65 (129)	0.67 (67)
GQ2, (HQ)	0.44 (146)	0.43 (86)	0.56 (56)	0.51 (170)	0.52 (103)	0.53 (53)
GQ2, (Normal)	0.82 (272)	0.80 (160)	0.84 (84)	1.0 (336)	0.95 (190)	0.89 (89)
LG-F750K (LG)	0.94 (313)	1.05 (211)	1.02 (102)	-	1.09 (217)	1.10 (110)

\* ( ): percentage of width error (calculated / measured, %)

경우 오차율을 56%(1m)와 53%(2m)에서 92%(1m)와 74%(2m)로 개선시키고 있음을 알 수 있다. 또한, 전체적인 오차의 원인으로 계산에 적용한 알고리즘의 영향을 고려해야 한다. 실제로 계산에 사용한 알고리즘은 이전 연구에서 일반 카메라 모듈과 수동조작 렌즈를 사용한 결과로서 블러링과 왜곡의 영향을 고려하여 과대평가된 픽셀수를 감소시키는 방법을 적용하고 있으나 스마트폰 이미지의 특성을 반영하지 못하고 있다. 따라서, 균열폭을 산정하는 방법에 대해서 스마트폰 이미지를 대상으로 보정작업이 선행되어야 할 것으로 판단되며 보정방법에 대한 후속 연구가 필요하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고해상도 스마트폰과 스마트폰 전용 렌즈를 이용해서 촬영한 이미지를 이용하여 실내 실험을 수행하였다. 촬영한 이미지를 이용하여 영상 처리 기법을 이용한 균열 추출과 균열길이 및 균열폭 계산의 정확성을 검토하였다. 균열 추출과 계산은 Otsu함수를 적용한 Lee et al.(2005)이 소개한 알고리즘을 토대로 기 개발된 알고리즘(Seo et al., 2020)을 이용하였다.

(1) 고해상도 스마트폰 카메라(64MP)와 일반 해상도 스마트폰 카메라(10MP, 12MP, 16MP)를 이용하여 1m, 2m, 3m 거리에서 균열 이미지(균열폭 0.1mm, 0.3mm, 0.5mm, 1.0mm) 를 촬영하였다. 촬영한 이미지에서

중심부 균열 영역에 대해 균열을 추출하고 균열 길이 및 균열폭을 계산하였다. 스마트폰 전용 렌즈(2배율)를 이용한 경우와 이용하지 않은 경우를 비교하였다.

(2) 균열 검출은 0.1mm 균열폭은 제외하고 2m 이내에서 높은 식별율을 나타내었다. 3m 거리에서는 거리에 따른 픽셀크기가 증가로 전체 균열 검출율이 낮았다.

(3) 균열 길이는 균열의 식별도가 높은 균열폭 1.0mm 경우 실제값에 약 10%의 오차율로 근접한 결과를 나타내었다. 0.3mm 균열폭은 고해상도 카메라(64MP)와 렌즈가 조합된 경우 64MP 스마트폰 카메라와 2배율 렌즈의 조합 계산 결과 ±10%의 오차율을 나타내었다.

(4) 64MP 스마트폰 카메라와 2배율 렌즈의 조합은 기존 개발한 라즈베리파이 HQ 카메라와 초점거리 12mm 렌즈의 조합과 유사한 수준의 단위 픽셀크기를 나타내었다. 또한, 균열폭 0.3mm, 0.5mm, 1mm 균열폭에 대하여 뚜렷하게 픽셀수가 증가하여 촬영거리 2m 이내에서 0.3mm 측정이 가능할 것으로 평가되었다.

(5) 균열폭값은 균열폭이 작은 경우 과대평가되는 경향을 나타냈으며 균열폭이 큰 경우 과소평가되었다. 과대평가의 원인은 이미지 자체의 블러링 영향과 적용하고 있는 모폴로지 기법에 의한 영향 등으로 설명될 수 있으며 과소평가는 사용된 계산 알고리즘에 의한 영향으로 평가되었다.

(6) 기 개발된 균열폭 계산 방법의 경우 일반 카메라와 수동렌즈를 기준으로 개발된 결과로서 스마트폰 이미지에 적용할 경우 스마트폰의 이미지 특성을 반영하여 보정



작업이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

- (7) 본 연구의 실내실험에서는 2차원 균열 이미지를 사용하였으나, 실제 균열은 깊이 정보를 포함하는 3차원 조건이므로 시간 및 공간적 특성 등 촬영 조건 변화에 민감하게 반응할 수 있다. 이미지 처리방법은 균열 주변 픽셀의 음영차이를 이용하는 기술이므로 실제 3차원 조건의 균열의 경우 촬영환경에 따라 처리결과가 달라질 것으로 판단된다. 본 연구는 균열측정을 위해 스마트폰 카메라와 렌즈의 적용성 분석으로 목적으로 하여 실내 동일한 환경에서 촬영한 결과를 기반으로 분석하였으며, 추후 실제 균열에 대한 실험을 보완하여 비교 분석이 필요할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This research was supported by a grant from the project “Development of mobile images and cloud-based portable structures crack investigation device” which was funded by the Korean Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) and the Construction Technology Research Program (21SCIP-C151438-03) funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

## References

1. Doihara, T., Hirono, K. and Oda, K. (1993), “Crack measuring system based on Hierarchical Image Processing technique”, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.29, No.5, pp.155-159.
2. Jeong, S. S., Heo, J. and Woo, S. K. (2008), “Empirical modeling of lens distortion in change of focal length”, *Korean Journal of Geomatics*, Vol.26, No.1, pp.93-100. (in Korean)
3. Lee, B. Y., Kim, Y. Y. and Kim, J. K. (2005), “Development of image processing for concrete surface cracks by employing enhanced binarization and shape analysis technique”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.17, No.3, pp.361-368. (in Korean)
4. Lee, H. B., Kim, J. W. and Jang, I. Y. (2012), “Development of automatic crack detection system for concrete structure using image processing method”, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.16, No.1, pp.64-77. (in Korean)
5. Ni, T., Zhou, R., Gu, C. and Yang, Y. (2020), “Measurement of concrete crack feature with android smartphone APP based on digital image processing techniques”, *Measurement*, Vol. 150, 107093.
6. Oh, S-J. (2012), “A study on characteristics of smart phone camera module for measuring a shooting object”, *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication, JIIWT*, Vol.12, No.5, pp.99-105. (in Korean)
7. Otsu, N. (1979), A threshold selection method from gray-level histogram. *IEEE Transactions on Systems, MAN, and Cybernetics*, vol.SMC-9, No.1, pp.62-66.
8. Seo, S., Ohn, S-Y., Kim, D-H., Kwak, K. and Chung, M. (2020), “A study on development of portable concrete crack measurement device using image processing technique and laser sensors”, *Journal of Geosynthetics Society*, Vol.19, No.4, pp.41-50. (in Korean)
9. Sonka, M., Hlavac, V. and Boyle R. (2015). “Image processing, analysis, and machine vision”, 4th edition of CL Engineering, Boston, MA.
10. Tanaka, N. and Uematsu, K. (1998), “A crack detection method in road surface images using morphology”, *Proceeding of IAPR Workshop on Machine Vision Application*, Chiba, Japan. pp.154-157.
11. Zhang, W., Zhang, Z., Qi, D. and Liu, Y. (2014), “Automatic crack detection and classification method for subway tunnel safety monitoring”, *Sensors*, 14, pp.19307-19328.