

저해상도 하수관거의 균열 탐지를 위한 영상처리 알고리즘

손병직, 전준용, 허광희*
건양대학교 해외건설플랜트학과 교수

Image Processing Algorithm for Crack Detection of Sewer with low resolution

Son, Byung Jik, Jeon, Joon Ryong, Heo, Gwang Hee*

Department of International Civil & Plant Engineering, Konyang University

요약 국내에서 하수관로 탐사장치는 200만 화소 이상의 고해상도 디지털 카메라를 이용한 제품이 개발되어 있으나 30만 화소 이하의 장치가 대부분 사용되고 있다. 특히, 10만화소 이하의 장치가 아직도 많이 사용되고 있어, 영상처리를 위한 환경이 매우 열악하다. 본 연구에서 다루는 하수관 영상은 매우 저해상도($240 \times 320 = 76,800$ 화소)로 균열탐지가 매우 어렵다. 국내에서 이러한 저해상도 하수관거 영상이 대부분이기 때문에, 이를 연구대상으로 선택하였다. 이러한 저해상도 영상으로 하수관거의 균열을 자동으로 탐지하는 기법을 디지털 영상처리 기술을 이용하여 연구하였다. 총 8단계를 거쳐 균열을 자동으로 탐지하는 프로그램을 개발하였으며, 기본적으로 Matlab 프로그램의 함수를 이용하였다. 2단계에서 최적의 임계값을 찾는 알고리즘과 5단계에서 균열을 판단하는 알고리즘을 개발하였다. 2단계는 자막이 흰색이기 때문에 자막이 없는 원래 영상보다 Otsu's 임계값(threshold)이 높게 계산이 되는 점에 착안하여 Otsu 임계값을 시작으로 0.01씩 감소시키면서 최적의 임계값을 찾는 방법 알고리즘이며, 5단계는 길이가 10mm(40픽셀) 이상이고 폭이 1mm(4픽셀) 이상으로 판단하여, 균열을 탐지하는 알고리즘이다. 해석 결과 매우 저해상도 영상임에도 불구하고 균열 탐지 결과가 우수한 것으로 판단된다.

Abstract In South Korea, sewage pipeline exploration devices have been developed using high resolution digital cameras of 2 mega-pixels or more. On the other hand, most devices are less than 300 kilo-pixels. Moreover, because 100 kilo-pixels devices are used widely, the environment for image processing is very poor. In this study, very low resolution ($240 \times 320 = 76,800$ pixels) images were adapted when it is difficult to detect cracks. Considering that the images of sewers in South Korea have very low resolution, this study selected low resolution images to be investigated.

An automatic crack detection technique was studied using digital image processing technology for low resolution images of sewage pipelines. The authors developed a program to automatically detect cracks as 6 steps based on the MATLAB functions. In this study, the second step covers an algorithm developed to find the optimal threshold value, and the fifth step deals with an algorithm to determine cracks. In step 2, Otsu's threshold for images with a white caption was higher than that for an image without caption. Therefore, the optimal threshold was found by decreasing the Otsu threshold by 0.01 from the beginning. Step 5 presents an algorithm that detects cracks by judging that the length is 10 mm (40 pixels) or more and the width is 1 mm (4 pixels) or more. As a result, the crack detection performance was good despite the very low-resolution images.

Keywords : image processing, low resolution, sewer, CCTV, crack detection, user algorithm

이 논문은 2014년도(No. 2014R1A1A2058384) 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.

*Corresponding Author : Heo Gwang Hee(Konyang University)

Tel: +82-41-730-5631 email: heo@konyang.ac.kr

Received October 27, 2016

Accepted February 3, 2017

Revised (1st November 21, 2016, 2nd December 6, 2016)

Published February 28, 2017

1. 서론

최근 이슈가 되고 있는 국내 도심지 지반함몰(sink hole)은 70~80년대 집중적으로 건설된 하수관거의 노후화로 주변 토사가 유실되어 발생하는 경우가 많다. 지반침하를 예방하기 위한 목적으로 전국 980개 지자체의 20년 이상 노후 하수관 12,000km에 대한 일제 정밀조사를 실시하고 있다[1,2].

현재 하수관거의 유지관리는 인력기반으로 점검자의 육안으로 상태를 평가하기 때문에 많은 시간과 노력이 소모되며, 결과에 대한 객관성 및 신뢰성이 떨어진다. 이러한 문제점을 보완할 수 있는 방법 중의 하나가 디지털 영상처리 기술을 이용하는 것이다.

하수관거 CCTV조사도 영상을 분석할 수 있는 이미지프로세싱 기법의 도입이나 장치의 개발에 관한 연구들이 진행되어 왔다. Xu et al. [3]은 환형 레이저포인트가 부착된 탐사장치를 이용하여 이미지 분석을 통해 하수관의 변형을 측정하였다. McKim and Sinha[4]은 기본적인 이미지프로세싱 기법들을 이용하여 하수관 내 균열(crack)의 정보를 추출하였고, Moselhi and Shehab-Eldeen[5]은 더하여 인공지능망 방법을 적용하였다. 이후 머신러닝을 적용한 발전된 이미지프로세싱[6] 등의 연구가 진행되었지만, 하수관과 같이 어둡고 장애물이 많은 환경에서 이동하면서 촬영하는 영상의 품질은 매우 낮을 수밖에 없기 때문에 실제로 개발된 이미지프로세싱 기법을 적용하기에는 한계가 있다. 결국 자동화를 위해서는 좋은 품질의 영상을 얻는 방법이 최선이므로 Yang et al.[7]은 하수관로 촬영 영상의 품질평가 방법을 제안하기도 하였다.

하수관로 탐사장치는 200만 화소 이상의 고해상도 디지털 카메라를 이용한 제품이 개발되어 있으나 30만 화소 이하의 장치가 대부분 사용되고 있다[1,2].

본 연구에서 다루는 영상은 매우 저해상도($240 \times 320 = 76,800$ 화소)로 균열탐지가 어렵다. 국내에서 이러한 저해상도 하수관거 영상이 대부분이기 때문에, 이를 연구대상으로 선택하였다. 이러한 저해상도 영상으로 하수관거의 균열을 자동으로 탐지하는 기법을 디지털 영상처리 기술을 이용하여 연구하였다.

본 연구에서 영상처리는 기본적으로 Matlab 프로그램의 Image Processing(IP) Toolbox를 이용하여 수행하였다[8].

Table 1. The information of sewer video

Duration	200 s
Bits Per Pixel	24
Frame Rate	30
Video Format	RGB24
Height	240
Width	320

하수관거 CCTV영상 정보는 Table 1과 같으며, 매우 저해상도 영상($240 \times 320 = 76,800$ 화소)이다. 하수관거 균열 탐지 과정은 Fig. 1 및 Table 2와 같이 6단계의 과정을 거친다. Fig. 1과 같이 Step 2~Step 5는 루프 구간으로 일정 범위까지 반복된다. 본 루프구간에서 사용자 알고리즘이 필요하며, 자세한 사항은 3장에서 설명하고자 한다.

균열 탐지 과정을 각 단계별로 내용을 간략하게 요약하면 다음과 같다[9~15].

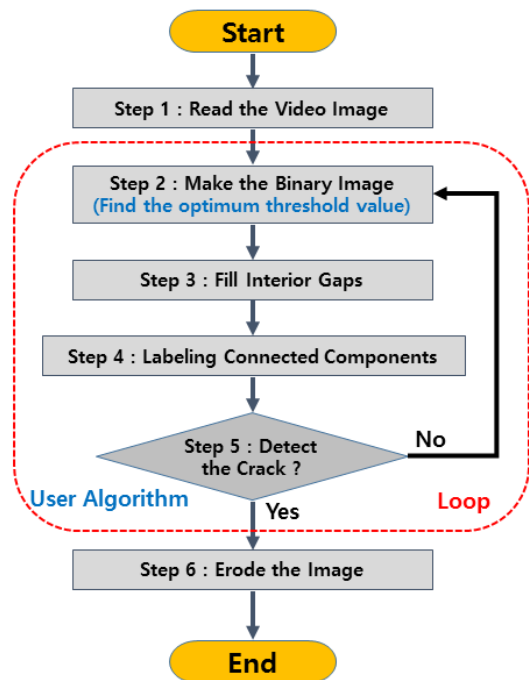
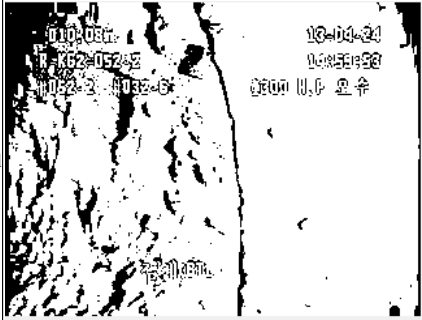
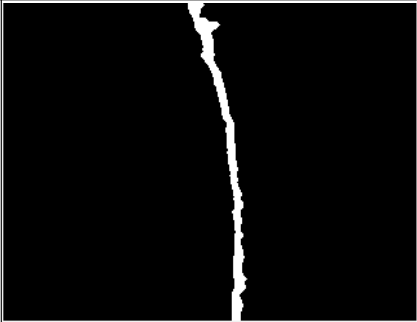


Fig. 1. Flow Chart

2. 균열 탐지 절차

Table 2. The analysis procedures (time = 124s)

Step 1 : Read the Video Image (Original Image)		Step 2 : Make the Binary Image	
Read the image		Binary image for crack detection (Find the optimum threshold value) Algorithm 1	
Step 3 : Fill Interior Gaps		Step 4 : Labeling Connected Components	
Fill ↓ Complement the image		Dilate the image ↓ Labeling (The color of crack is blue)	
Step 5 : Detect the Crack		Step 6 : Erode the Image	
Algorithm 2		Erosion for image restoration	

2.1 Step 1 : Read the Video Image

Step 1은 하수관거 동영상의 영상을 Matlab을 이용하여 읽는 단계이다. 시간이 124s 일 때를 예제로 설정하여, 설명하였다.

2.2 Step 2 : Make the Binary Image

Step 2는 균열을 탐지하기 위해 이진영상으로 변환하는 단계이다. 본 단계에서는 최적의 임계값(threshold value)을 찾기 위해 사용자 알고리즘(Algorithm 1)이 필요하다. 3장에서 자세하게 설명하고자 한다.

2.3 Step 3 : Fill Interior Gaps

Step 3은 imfill 함수를 이용하여 균열 내부를 채우는 단계이며, 대부분 균열만 남게 된다. 균열이 아닌 것은 다음 단계의 방법을 통하여 제거할 수 있다. 또한, 균열을 백색으로 표시하기 위해서 영상을 반전시키는 단계이다.

2.4 Step 4: Labeling Connected Components

균열을 잘 탐지 위해서 먼저 imdilate 함수를 이용하여 물체들을 팽창시킨다. 그런 후에 연결 성분들의 레이블링을 통해서 배경과 물체(균열)를 분류한다. 즉, bwlabel 또는 bwboundaries 함수를 이용하여 레이블링한다.

2.5 Step 5 : Detect the Crack

균열 유무를 판단하는 단계 즉, 균열만 추출하는 단계로 Step 5에서 레이블링된 물체가 균열인지 여부를 판단한다. 본 단계에서는 사용자 알고리즘(Algorithm 2)이 필요하며, 3장에서 자세하게 설명하고자 한다.

2.6 Step 6 : Erode the Image

Step 4에서 균열을 잘 탐지하기 위해서 균열을 팽창시킨 것을 원래의 크기로 변환시키는 단계로, imerode 함수를 이용하여 영상을 침식시킨다. 영상의 침식이란 영상을 얇게 하는 것을 의미한다.

3. 균열 탐지 알고리즘

균열을 탐지하기 위한 사용자 알고리즘은 2가지이다. Step 2에서의 Algorithm 1과 Step 5에서의 Algorithm 2이다.

3.1 최적의 임계값을 찾기 위한 알고리즘

영상을 이진화하기 위해서 보통 Otsu 방법[9,10]을 이용한다. 하지만, 본 연구에서 다루는 영상은 Otsu 방법을 이용하면 Fig. 2와 같이 균열을 탐지할 수 없게 된다. 이러한 이유는 영상이 240×320의 매우 저해상도이고 하수관거의 비등방성인 특징 때문인 것으로 분석된다. 또한, 영상에 삽입된 자막의 영향이 큰 것으로 분석된다. 균열은 검정색인데 삽입된 자막은 흰색이기 때문에 Otsu 방법을 이용하면 정확한 임계값(threshold)보다 다소 높은 임계값을 찾아 균열을 탐지하지 못한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 Table 3과 같은 알고리즘을 개발하였다. 임계값의 범위는 0~1이며, 그레이스케일 영상의 0~255값을 의미한다.

Table 3은 영상에서 자막이 흰색이기 때문에 자막이 없는 원래 영상보다 Otsu's 임계값(threshold)이 높게 계산이 되는 점에 착안하여 Otsu 임계값을 시작으로 0.01씩 감소시키면서 최적의 임계값을 찾는 방법이다. Step 5에서 균열을 탐지한 임계값을 저장하고, 최종적으로 평균값 또는 최솟값을 최적의 임계값($T_{optimum}$)으로 취한다.

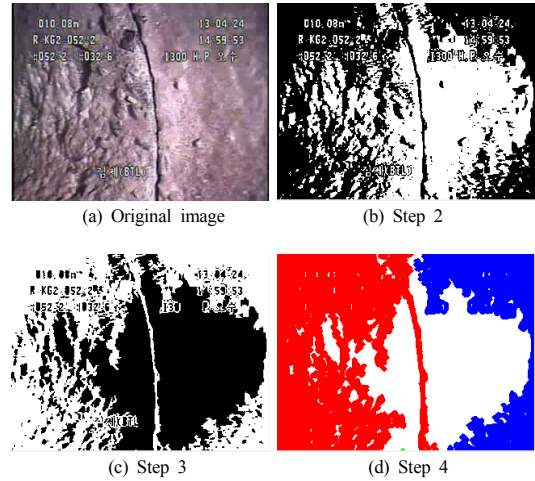


Fig. 2. Results using Otsu's method at 124s

Table 3. Algorithm for optimum threshold

Algorithm 1	
Start	Global image threshold using Otsu's method (T_{otsu})
Step 2	Make the Binary Image
Step 3	Fill Interior Gaps
Step 4	Labeling Connected Components
Step 5	Detect the Crack (Algorithm 2)
Upgrade	($T = T_{otsu} - 0.01$) Goto Step 3 Repeat
End	Average or Minumin of threshold(T) at Step ($T_{optimum}$)

Table 4, 5는 124초의 영상을 임계값 변화에 따른 예를 보여준다. Table 4, 5는 Otsu 임계값에서 시작하여 0.01씩 감소시켜 해석한 결과이다. 여기서, 임계값이 너무 작아지면 결과를 잘 못 탐지하게 되어 문제가 발생한다. Table 4는 임계값을 최적으로 탐지할 수 있는 범위의 결과이다. 임계값을 최적으로 탐지할 수 있는 범위는 Otsu 임계값에서 0.17을 뺀 범위($T_{otsu} - 0.17$)이다. “4장 결과분석”에서 자세히 설명하였다.

Table 4의 결과를 보면 임계값의 최솟값(T_{min})에서 결과가 가장 좋은 것을 알 수 있다. 그러나, Table 5와 같이 임계값의 범위가 커지면 T_{max} 는 일정하나 T_{min} 이 작아져 T_{mean} 도 작아진다. 이때는 임계값의 평균값(T_{mean})이 가장 좋은 결과를 나타낸다. 즉, 최적의 임계

값은 임계값의 범위에 따라서 최솟값을 취할 수도 있고 평균값을 취할 수도 있다.

Table 4. Results by threshold change at 124s
($T_{otsu} : -0.01 : T_{otsu} - 0.17$)

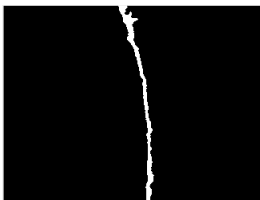
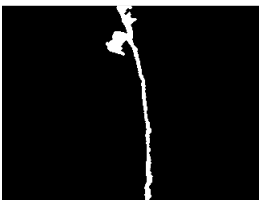
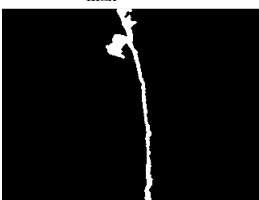
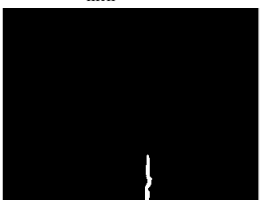
Original image	$T_{mean} = 0.355$
	
$T_{max} = 0.39$	$T_{min} = 0.32$
	
Threshold using Otsu's method : $T_{otsu} = 0.49$	

Table 5. Results by threshold change at 124s
($T_{otsu} : -0.01 : T_{otsu} - 0.30$)

Original image	$T_{mean} = 0.325$
	
$T_{max} = 0.39$	$T_{min} = 0.26$
	
Threshold using Otsu's method : $T_{otsu} = 0.49$	

3.2 균열 탐지를 위한 알고리즘

Step 5에서 균열을 찾기 위한 알고리즘이다. 즉, Step 4의 레이블링한 영상에서 균열을 찾는 알고리즘이 필요하다.

본 연구에서 다루는 영상의 균열은 세로로 되어 있는 점에 착안하여, 세로 방향은 균열의 길이를, 가로 방향은

균열의 폭으로 판단하였다.

균열은 길이가 10mm(40픽셀) 이상이고 폭이 1mm(4픽셀) 이상으로 판단하여, 균열을 탐지하였다. 또한, Table 2의 Step 4에서와 같이 영상 특성상 맨 좌측과 맨 우측은 검정으로 나타나 이 부분은 제외하여, 균열을 탐지하였다. 알고리즘은 Table 6에 정리하였다.

Table 6. Algorithm for crack detection

Algorithm 2	
Input : Label image $f(j, i)$ Output : Crack image $g(j, i)$ ($1 \leq j \leq sz(1), 1 \leq i \leq sz(2)$)	
1	Use the labeled image $f(j, i)$ of step 5
2	for (k = 1 to No. of label)
3	Except left edge and right edge
4	for (j = 1 to sz(1))
5	The counting of crack width
6	end
7	for (i = 1 to sz(2))
8	The counting of crack length
9	end
10	Crack detection - crack width $\geq 1\text{mm}(4\text{pixel})$ - crack length $\geq 10\text{mm}(40\text{pixel})$
11	end

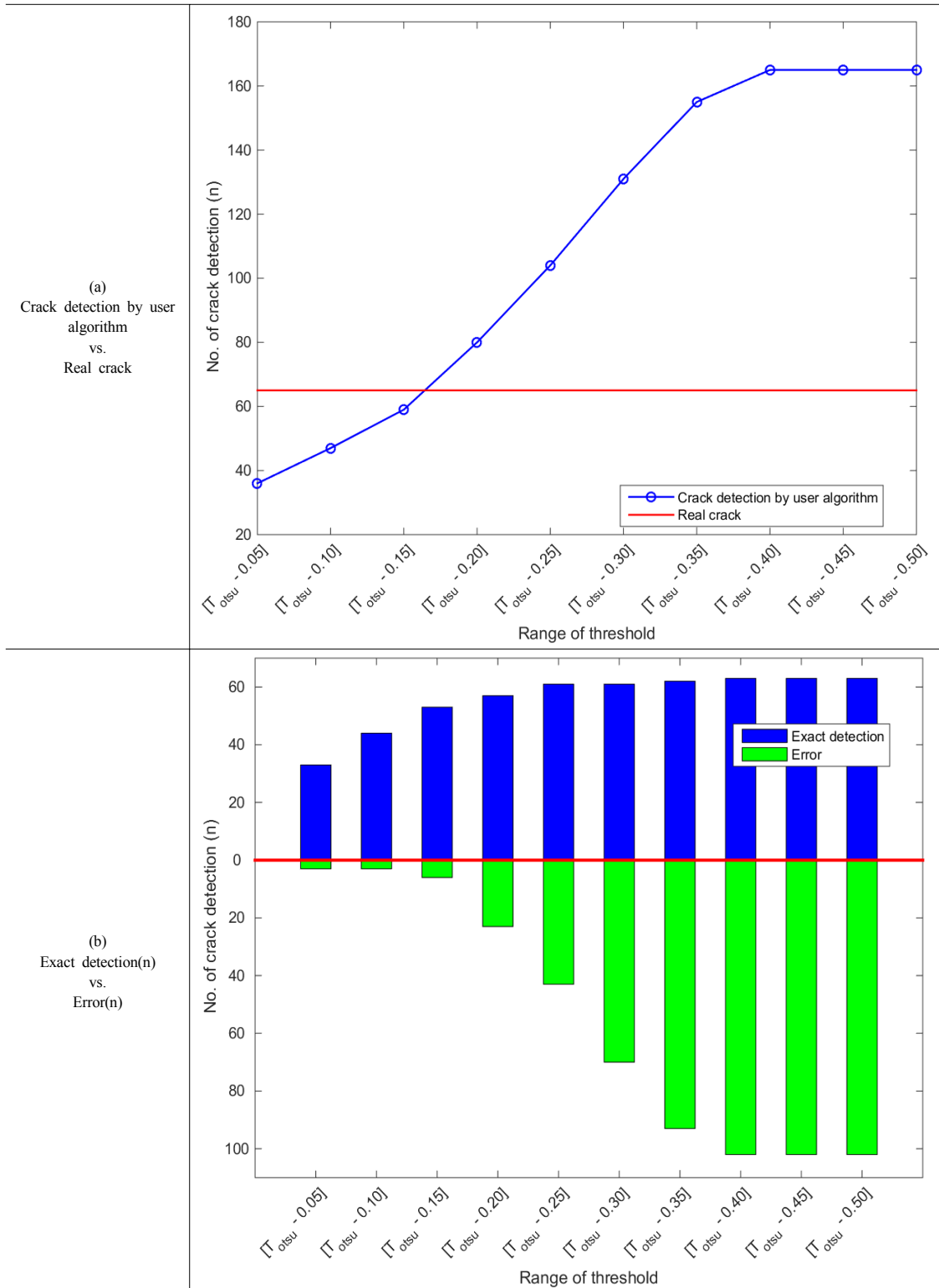
4. 결과 및 분석

2장에서 제시한 해석 절차와 3장에서 제시한 알고리즘을 통하여 하수관거 동영상의 균열 탐지 결과를 분석하였다.

우선, Algorithm 1의 임계값 변화에 따른 균열 탐지 타당성을 분석하였다. Table 7은 균열 탐지 결과를 나타낸 것이다. 균열은 초당 1개의 영상으로 탐지하였기 때문에 총 200개의 영상을 분석하였다. 200개중에 실제 균열은 65개이다.

Table 7(a)는 균열의 개수만 검토한 것으로 실제의 균열(65개)보다 많이 탐지된 경우도 있다. 이것은 잘못 탐지한 경우이다. Table. 7(b)에서 정확하게 균열을 탐지한 것은 위쪽(파란색)에 잘못 탐지한 것은 아래쪽(녹색)에 표시하였다. 그래프의 가로축 $T_{otsu} - 0.05$ 등은 $T_{otsu} : -0.01 : T_{otsu} - 0.05$ 즉, otsu 임계값에서 0.01씩 감소시켜 $T_{otsu} - 0.05$ 등까지를 의미한다.

Table 7. Crack detection by threshold variation



정확하게 탐지한 것은 33~63개이며, 임계값의 범위를 크게 할수록 잘못 탐지한 경우가 많아지고 있다. 특히, $T_{otsu} - 0.20$ 경계에서 에러가 급속도로 커지고 있다.

Table 8은 Table 7을 표로 요약한 것이다. 최적의 임계값의 범위는 $T_{otsu} - 0.15 \sim T_{otsu} - 0.20$ 으로 분석되며, 이 범위에서 결과를 Table 9에 나타내었다. Table 9에서 살펴보면, 최적의 임계값의 범위는 정확도가 84.6%이고, 에러율이 5.2%인 $T_{otsu} - 0.17$ 로 분석된다.

최적의 임계값 범위로 분석된 $T_{otsu} - 0.17$ 를 선택하여, 해석 예를 분석하여, Table 10~13에 해석 결과를 나타내었다. Table 10은 매우 좋은 결과(Excellent results)를, Table 11은 좋은 결과(Good results)를, Table 12~13은 좋지 않은 결과(Bad results)를 나타낸 것이다.

Table 10의 매우 좋은 결과(Excellent results)는 균열의 유무를 잘 판단하고, 균열의 상태(크기 및 위치)를 잘 표현한 경우이고, Table 11의 좋은 결과(Good results)는 균열의 유무는 잘 판단하나, 균열의 상태는 Table 11과 같이 다소 잘못 판단한 경우이다. 또한, Table 12, 13의 좋지 않은 결과(Bad results)는 2가지 유형으로 구분하였다. 즉, Table 12는 실제 균열이 아닌데 균열로 잘못 판단한 경우(Type A)이고, Table 13은 실제 균열인데 균열로 판단하지 못한 경우(Table B)를 나타낸다.

Table 8. Summary by threshold variation

Range of threshold	No. of crack detection (n)		No. of crack detection (%)	
	Exact detection	Error	Exact detection (n/65×100)	Error (n/135×100)
$T_{otsu} - 0.05$	33	3	50.8	2.2
$T_{otsu} - 0.10$	44	3	67.7	2.2
$T_{otsu} - 0.15$	53	6	81.5	4.4
$T_{otsu} - 0.20$	57	23	87.7	17.0
$T_{otsu} - 0.25$	61	43	93.8	31.9
$T_{otsu} - 0.30$	61	70	93.8	51.9
$T_{otsu} - 0.35$	62	93	95.4	68.9
$T_{otsu} - 0.40$	63	102	96.9	75.6
$T_{otsu} - 0.45$	63	102	96.9	75.6
$T_{otsu} - 0.50$	63	102	96.9	75.6

Table 9. Summary for optimum threshold

Range of threshold	No. of crack detection (n)		No. of crack detection (%)	
	Exact detection	Error	Exact detection (n/65×100)	Error (n/135×100)
$T_{otsu} - 0.15$	53	6	81.5	4.4
$T_{otsu} - 0.16$	53	6	81.5	4.4
$T_{otsu} - 0.17$	55	7	84.6	5.2
$T_{otsu} - 0.18$	56	10	86.2	7.4
$T_{otsu} - 0.19$	56	15	86.2	11.1
$T_{otsu} - 0.20$	57	23	87.7	17.0

5. 결론

본 연구는 저해상도($240 \times 320 = 76,800$ 화소) 하수관거 영상의 균열을 자동으로 탐지하는 알고리즘을 개발하였다.

총 6단계를 거쳐 균열을 자동으로 탐지하며, 기본적으로 Matlab 프로그램의 함수를 이용하였다. 2단계에서 최적의 임계값을 찾는 알고리즘과 5단계에서 균열을 판단하는 알고리즘을 개발하였다.

최적의 임계값을 찾기 위해서 Otsu 임계값에서 0.01씩 감소시켜 해석을 수행하였다. 정확하게 탐지한 것은 65개중에서 33~63개이며, 임계값의 범위를 크게 할수록 잘못 탐지한 경우가 많아지고 있다. 특히, $T_{otsu} - 0.20$ 경계에서 에러가 급속도로 커지고 있다.

최적의 임계값의 범위는 정확도가 84.6%이고, 에러율이 5.2%인 $T_{otsu} - 0.17$ 로 분석되었으며, 이를 기반으로 $T_{otsu} - 0.16$ 에서 ± 0.01 의 값을 추천한다.

균열을 찾기 위한 알고리즘은 길이가 10mm(40픽셀) 이상이고 폭이 1mm(4픽셀) 이상을 균열로 판단하여, 알고리즘을 개발하였다.

매우 저해상도($240 \times 320 = 76,800$ 화소) 영상임에도 불구하고 균열 탐지 결과 우수한 것으로 판단된다.

영상의 해상도가 높아지거나 알고리즘을 개선하면 보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 국내 저해상도 영상의 균열 탐지에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 12. Bad results (Type A)

time (s)	Real crack	Sample image	
11	X	t = 11s	t = 120s
26	X		
57	X		
107	X		
120	X	t = 107s	t = 137s
137	X		
139	X		

No. of bad results (Type A) : 7

Table 13. Bad results (Type B)

time (s)	Real crack	Sample image			
33	O	t = 33s	t = 59s	t = 128s	t = 153s
59	O				
88	O				
121	O				
128	O				
153	O	t = 88s	t = 121s	t = 168s	t = 173s
168	O				
169	O				
171	O				
173	O				

No. of bad results (Type B) : 10

REFERENCES

- [1] Kim, B. C., Son, B. J., Choi, C. H., and Park, K. T. (2015), Damage Estimation of Sewer Pipe using Image Processing of the Investigation Video, Paper presented at the Proceedings of Korean Society of Civil Engineers Conference, Kunsan, Republic of Korea, 2015.
- [2] Son, B. J., Lee, S. Y. (2015), "Study on Fracture Area Measurement of Tension Specimen using Digital Image Processing", The Conference of The Korean Society for Advanced Composite Structures, pp. 45-46, 2015.
- [3] Xu, K., Lxmoore, A. R., and Davies, T. (1998), Sewer pipe deformation assessment by image analysis of video surveys, Pattern Recognition, 31(2), 169-180, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(97\)00037-X](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(97)00037-X)

- [4] McKim, R. A., and Sinha, S. K. (1999), Condition assessment of underground sewer pipes using a modified digital image processing paradigm, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 14, 29-37, 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00021-3)
- [5] Moselhi, O., and Shehab-Eldeen, T. (1999), Automated detection of surface defects in water and sewer pipes, *Automation in Construction*, 8(5), 581-588, 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(99\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(99)00007-2)
- [6] Yang, M. D., and Su, T. C. (2008), Automated diagnosis of sewer pipe defects based on machine learning approaches, *Expert Systems with Applications*, 35(3), 1327-1337, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.08.013>
- [7] Yang, M. D., Su, T. C., Pan, N. F., and Yang, Y. F. (2011), Systematic image quality assessment for sewer inspection, *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1766-1776, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.103>
- [8] MathWorks, I. (2015). *Matlab Image Processing Toolbox* (Version 2014).
- [9] N. Otsu (1979), "A threshold selection method from gray-level histograms," in *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 9, pp. 62-66, 1979.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- [10] M. M. Fraz, M. Javed, and A. Basit (2008), "A threshold selection method from gray-level histograms," in 4th IEEE International Conference on Emerging Technologies, pp. 232-236, 2008.
- [11] Ahrary, A., Tian, L., Kamata, S., and Ishikawa, M. (2005), An autonomous sewer robots navigation based on stereo camera information, Paper presented at the International Conference on Tools with Artificial Intelligence, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ictai.2005.35>
- [12] Duran, O., Althoefer, K., and Seneviratne, L. D. (2002), State of the art in sensor technologies for sewer inspection, *Sensors Journal*, IEEE, 2(2), 73-81, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2002.1000245>
- [13] Esquivel, S., Koch, R., and Rehse, H. (2009), Reconstruction of sewer shaft profiles from fisheye-lens camera images *Pattern Recognition* (pp.332-341): Springer, 2009.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-03798-6_34
- [14] Ilg, W., Berns, K., Cordes, S., Eberl, M., and Dillmann, R. (1997), A wheeled multi-joint robot for autonomous sewer inspection, Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1109/iros.1997.656584>
- [15] ME (2011), *Standard Manual for Sewer CCTV Inspection and Repair Criterion*: Ministry of Environment, 2011.

손 병 직(Byung-Jik Son)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 건양대학교 해외건설플랜트학과 교수

<관심분야>

복합재료, 디지털영상처리, 손상탐지, 지진공학, 교량공학, 빅데이터 분석, 기계학습

전 준 용(Joon-Ryong, Jeon)

[정회원]



- 2004년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 8월 : 충남대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2013년 8월 ~ 현재 : 건양대학교 해외건설플랜트학과 연구전문조교수

<관심분야>

건설구조물 구조건전도 모니터링 및 상태평가
실시간 피드백 진동제어 및 그 제어장치 개발
무선 센서 네트워크 기반 생체모방 압축 센싱

허 광 희(Gwang-Hee Heo)

[정회원]



- 1994년 2월 : New Mexico 대학 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : New Mexico 대학 토목공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 건양대학교 해외건설플랜트학과 교수

<관심분야>

구조물상태모니터링, 진동제어, 손상계측, 무선계측, 지진공학