

컴퓨터비전을 이용한 지중관로의 직경 측정

김기범^{a*}, 조성만^b, 주원종^a

Measurement of the Underpipe Diameter by using Computer Vision

Gibom Kim^{a*}, Sungman Cho^b, Wonjong Joo^a^a Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea^b DELI-I Co. Ltd., Kwanyang Doosan Venturedigm,
#808, 250, Hakui-ro, Dongan-gu, Anyang, Gyeonggi-do, 14056, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	13	March	2017
Revised	31	March	2017
Accepted	10	April	2017

Keywords:

Computer vision
Underground PVC spiral pipe
Diameter measurement
Image processing

ABSTRACT

This study developed an image processing system for detecting damages on underground spiral PVC pipes. The detection method is simple—identifying damaged areas by measuring circularity along the pipeline. This uses the assumption that damage parts will not make a circular shape. Conventional devices check the circular shape of the pipe along the pipeline by measuring the angles between 6 spring-connected legs on the device. The conventional device, however, requires the insertion of 3 different wires (electrical, communication, and camera lines) along with a guide wire for pulling the device. The developed system presented here has simplified this system, requiring only a camera line while maintaining reasonable accuracy in damage detection.

1. 서론

최근 지상에 설치된 전력 및 통신망 등의 시설물들은 도시 미관과 안전성의 문제로 지중관로 매설 형태로 변화되고 있다. 하지만, 지중관로 매설 시 기존 설치된 다른 매설물을 파손할 위험성이 있으며, 지반 변동으로 인한 지중관로 파손 및 노화 부식으로 인한 결함으로 지중관로 매설에도 여러 문제점이 발생되고 있다.

지중관로의 결함은 단전사고 및 통신두절 등의 주요 원인이 되므로, 설치 및 유지보수에 효율적인 관리가 필요하지만, 지하 매설물에 접근하기가 어렵고 굴착 시에는 경제적 비용문제가 발생하게 된다^[6].

지중관로의 유지보수를 위하여 굴착 방식보다는 지중관로 내부

를 검사하거나 측정하는 비굴착 방식이 시간적, 경제적 장점을 지닌다. 지중관로 검사 및 측정 장비는 지중관로 내부로 투입시키는 검사/측정 하드웨어 및 하드웨어로부터 전송된 데이터를 처리하는 정보처리 소프트웨어로 구성된다.

지중관로 내부에는 일반적으로 물이나 이물질이 들어있는 경우가 대부분이어서, 검사/측정 하드웨어는 이러한 특수 환경에서도 동작할 수 있도록 설계되어야 한다. 오래 전부터 사용되는 검사/측정 하드웨어는, 지중관로 내에서 벌어지는 기구 메커니즘으로 벌어지는 각도를 이용하여 지중관로 직경을 측정한다. 또 다른 방식은 지중관로 내부에 레이저 슬릿빔을 주사하여 얻어진 영상을 통하여 지중관로 직경을 측정하는 방식이다^[1]. 기구 메커니즘 측정방식이나 레이저 슬릿빔 이용 측정방식을 이용하는 검사/측정 하드웨어에

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6342

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: gbkim@seoultech.ac.kr (Gibom Kim).

는 측정과 무관한 카메라가 부착되는데, 그 이유는 측정방식에 관계없이 외부에서 모니터로 지중관로 내부를 관찰하거나 증빙자료로써 활용하기 때문이다.

위의 두 가지 방식을 사용하기 위해서는 전원선, 통신선 및 카메라 영상 송수신 선로를 지중관로에 투입하여야 하는데, 그 거리는 100~200미터에 달하게 된다. 지중관로의 내부로 많은 선들을 이송시켜야 하므로, 이에 따른 여러 가지 문제점이 발생되고 검사/측정 장치가 매우 커지게 되는 단점이 있다.

이에 따라, 본 연구에서는 지중관로의 직경을 측정하기 위하여, 검사/측정 하드웨어로부터 전송되는 영상만으로 지중관로의 직경을 측정하고자 하며 위의 두 방식에 비하여 검사/측정 하드웨어가 간단하고, 부피가 작은 장점을 가진다.

2. 지중관로 측정 하드웨어

2.1 기구 메커니즘 측정 장치

통상적으로 지중관로를 설치할 때에는 추후 사용할 경우를 대비하여, 여러 개의 통신선 및 전력선을 위한 지중관로를 매설한다. 수개월 또는 수십 개월이 지난 후, 전력선 또는 통신선을 지중관로에 삽입하기 위하여 지중관로의 직경 및 곡률을 측정할 필요성이 발생한다. 지중관로 중간에 외압으로 인한 변형 때문에 직경이 줄어들면, 전선 또는 통신선이 통과할 수 없기 때문이다. 또한 전선 또는 통신선이 통과하기 위한 최소 곡률이 있으므로, 미리 지중관로 내부 직경 및 곡률을 측정하여야 한다.

Fig. 1은 매설되는 지중관로의 모습을 보여주며, 나선형 주름이진 PVC 지중관로를 사용한다.

지금까지는 지중관로 내부의 직경 및 곡률을 측정하기 위하여, Fig. 2와 같은 기구 메커니즘 측정 장치를 사용하였다.

일반적으로, 부설된 지중관로에는 측정 장치를 안내하기 위한 케



Fig. 1 Underground PVC spiral pipe

이블이 설치되어 있으며, 안내 케이블이 직경 및 곡률 측정 장치를 잡아당겨서 지중관로를 따라서 측정 장치가 이동하게 된다. Fig. 3은 지중관로 중앙에 안내 케이블의 모습을 보여준다. 측정 장치가 지중관로를 따라 이동하게 되면 관로 직경의 크기에 따라 측정 장치가 벌어지거나 오므러지게 되면서 직경을 측정하게 된다. 지중관로의 곡률은 Fig. 2와 같은 측정 장치 2개를 직렬로 연결하고, 2개의 측정 장치 간의 안내 케이블 선의 각도를 계산하여 측정한다.

Fig. 2의 기구 메커니즘 측정장치 가운데에는 카메라가 부착되고, 카메라 주위에는 LED가 설치되어 밝은 조명을 제공한다. 기구 메커니즘 측정 장치가 직경을 측정하면서 동시에 외부에서 지중관로의 상태를 육안으로 확인하기 위하여 카메라가 설치되어 내부 영상을 외부로 전송하게 된다.

앞에서 언급한 바와 같이, 기구 메커니즘 측정 장치는 전원선, 신호선 및 영상송수신선이 많이 필요하며, 100미터 이상의 지중관로에서 배선 문제가 심각하게 된다. 이러한 이유로 컴퓨터 비전을 이용한 측정 장치가 필요하다.

2.2 컴퓨터비전 직경 측정 장치

Fig. 2와 같은 기구 메커니즘 측정 장치에는 여러 전원선 및 신호



Fig. 2 Mechanism for measuring a diameter



Fig. 3 Inside Image of underground pipe

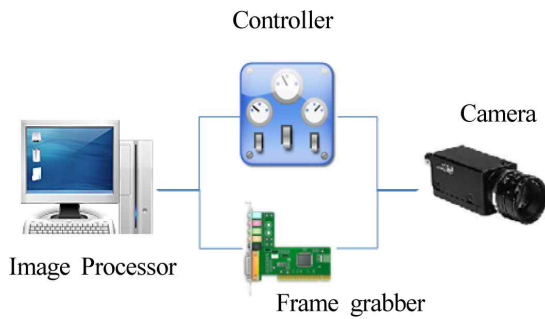


Fig. 4 System structure for image acquisition

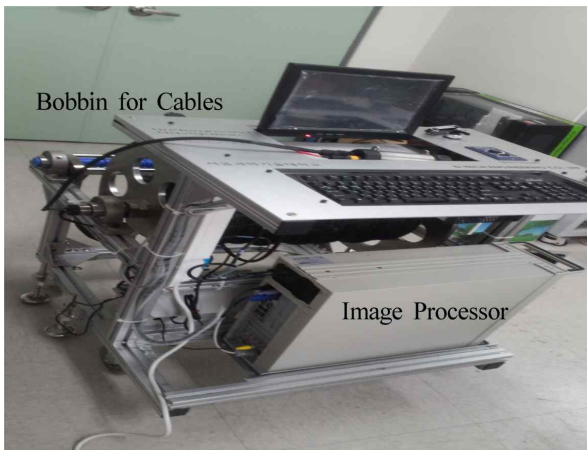


Fig. 5 Image processing system for measurement

선이 지중관로 길이만큼 필요하다. 이러한 문제는 현장에서 많은 어려움을 야기 시키기 때문에 전송되는 영상으로 관로 내부를 관찰 하면서 동시에 직경을 측정할 수 있는 컴퓨터비전 측정 장치가 연구되었다.

Fig. 4는 영상획득 시스템의 구성도를 보여주며, 카메라만 지중관로에 투입되고 제어기, frame grabber 및 영상처리 컴퓨터는 지중관로 외부에 위치하여 카메라로부터 영상을 전송받게 된다. 실제 관로측정 영상처리 컴퓨터 및 제어기는 Fig. 5와 같이 제작되었다.

컴퓨터비전 측정 장치의 카메라는 Fig. 2와 같은 기구 메커니즘 측정 장치 중앙의 카메라를 이용하였다. 기구 메커니즘 측정 장치 이용하여 기존 방식대로 직경을 측정한 것과 카메라 영상을 기반으로 컴퓨터비전을 이용한 직경 측정 결과와 비교하였다.

3. 지중관로 측정 소프트웨어

Fig. 3에서 보면, 지중관로로 사용되는 PVC 나선형 주름관은 산과 골이 나선형으로 회전하며, 산들로 이루어진 내부 직경이 측정하고자 하는 지중관로 직경이다. 지중관로 영상에서, 관로중심에서부터 관로 외부방향으로 직선을 긋고, 직선을 따라서 밝기값을 조사하면, 조명을 받는 주름산의 옆면의 밝기값이 구역 최대(local

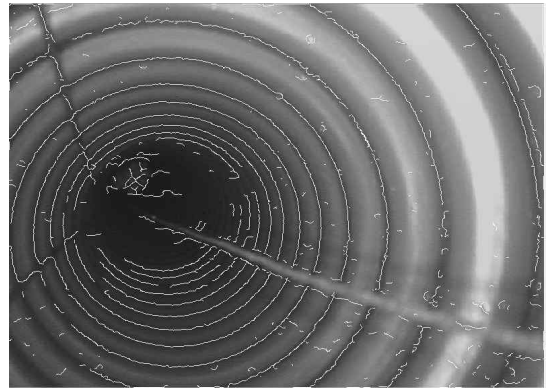


Fig. 6 Edge detection by using intensity



Fig. 7 Noise elimination and edge merging

maximum)의 밝기값을 가지는 것을 알 수 있다. 반면 주름산의 제일 높은 지점의 밝기값은 구역 최소(local minimum)값을 가진다. 구역별 제일 어두운 점을 찾고 이를 연결하면 Fig. 6의 엣지(edge) 영상을 얻을 수 있다. 처음부터 엣지를 영상처리 알고리즘으로 찾는 것보다 밝기값이 낮은 지점을 찾는 것이 훨씬 쉽다. 실제로 지중관로의 영상에서는 구역 최소값 지점이 엣지 지점과 거의 동일하다. 영상에서 보는 바와 같이 다양한 노이즈가 있기 때문에 엣지를 찾기 전에 preprocessing으로 미디어 필터링 2회와 스무딩 필터링 1회를 실시하였다^{2,5)}.

Fig. 6의 엣지영상은 구역 최소값을 가지는 모든 엣지가 검출되었으나 원하지 않는 약한 엣지 및 잡음도 포함되어 있다. 이를 제거하기 위하여 canny edge detector를 적용하였다³⁾.

$I(i,j)$: Intensity of the image

$$J_x = \frac{\partial I}{\partial x} : x \text{ gradient component}$$

$$J_y = \frac{\partial I}{\partial y} : y \text{ gradient component}$$

$$\text{Edge Strength } e_s(i,j) = \sqrt{J_x^2(i,j) + J_y^2(i,j)} \quad (1)$$

Fig. 6의 엣지를 따라 (1)식의 엣지강도(edge strength)를 계산하여 상위 30% 지점의 엣지 강도를 s_1 하위 30% 지점의 엣지 강도를 s_2 라고 한다. Fig. 7의 지중관로 영상에서 s_1 보다 큰 밝기값을 가지는 엣지점을 검색하고 그 엣지점으로 부터 s_2 보다 큰 엣지점을 연결해나가는 알고리즘을 적용하면 Fig. 7과 같은 영상을 얻을 수 있다.

Fig. 7의 영상에서 엣지강도가 상위 5%에 해당하는 엣지점을 찾아서 표시하면 Fig. 8의 점들을 구할 수 있다.

Fig. 8의 지중관로 영상에서 엣지점은 주름관의 산들 중에서 카메라의 초점거리에 위치한 엣지점들을 의미한다. 지중관로 중심을 이동하는 카메라로부터 초점거리에 위치한 엣지점들은 가장 강한 엣지강도를 가지기 때문이다.

Fig. 8에서 구한 엣지점들에 최소자승법(least square method)를 적용하여 엣지점들에 가장 적합한 원을 찾을 수 있다⁴⁾. 찾고자 하는 원의 식을 다음과 같이 정의한다.

$$(x-h)^2 + (y-k)^2 = r^2 \quad (2)$$

오차함수 F 는,

$$F(h,k,r) = \sum_{i=1}^n [(x_i-h)^2 + (y_i-k)^2 - r^2]^2 \quad (3)$$

오차함수 F 를 최소화하는 h, k, r 을 구하기 위하여 F 를 편미분하면 다음과 같은 3개의 식을 구할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n [(x_i-h)^2 + (y_i-k)^2 - r^2] = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i [(x_i-h)^2 + (y_i-k)^2 - r^2] = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i [(x_i-h)^2 + (y_i-k)^2 - r^2] = 0 \quad (6)$$

이때, A, B, C 를 다음과 같이 정의하면 위 식들은 행렬식으로



Fig. 8 Edge detection by using edge strength

나타낼 수 있다.

$$h = -\frac{A}{2}, k = -\frac{B}{2},$$

$$r = \frac{\sqrt{4C + A^2 + B^2}}{2}$$

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i \\ \sum x_i & \sum y_i & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i(x_i^2 + y_i^2) \\ \sum y_i(x_i^2 + y_i^2) \\ \sum x_i^2 + y_i^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

n : 엣지점들의 수

위 행렬식에 엣지점들을 대입하면 A, B, C 값을 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 h, k, r 값을 구할 수 있다. 이때 r 값은 엣지점들에 가장 적합한 원의 반지름을 나타낸다.

이러한 알고리즘을 이용하여 지중관로 직경을 측정하는 소프트웨어를 개발하였으며, 개발된 소프트웨어의 사용자 화면은 Fig. 9와 같다.

4. 결과 및 분석

본 연구에서 실험에 사용된 지중관로의 직경은 100 mm이며, 앞서 언급한대로 PVC 나선형 주름관이다. Fig. 3과 같이 지중관로 중앙에 측정 장치 안내 와이어가 있으며, 이를 이용하여 측정 장치를 이동시킨다. 측정장치 이동거리는 안내 와이어의 이동거리를 포텐서미터로 측정한 값을 사용한다.

카메라가 이동하면서 각 프레임별로 엣지강도가 높은 엣지점들에 가장 적합한 원을 계산하고 계산된 직경은 카메라 초점거리 150 mm 전방의 직경 100 mm 가상원의 직경과 비교하여 직경값을 추정한다.

컴퓨터비전을 이용한 측정결과와 신뢰성을 확보하기 위하여 동일한 지중관로를 기존의 기구 메커니즘 측정 장치로 측정하여 비교

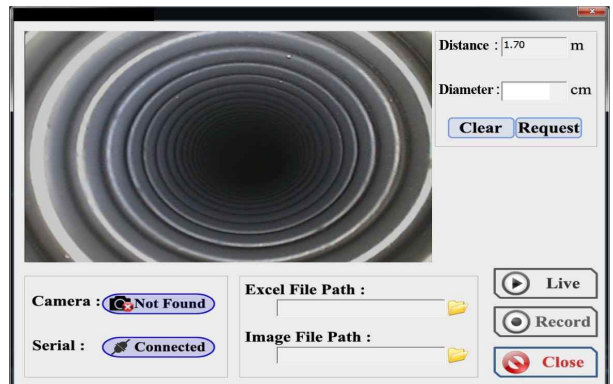


Fig. 9 User interface of software developed

Table 1 The 1st results of measuring the diameter

Distance	Computer vision(mm)	Mechanism(mm)
0	102.68	104.27
1	104.13	104.27
2	99.42	104.27
3	101.42	104.27
4	103.97	104.54
5	102.58	104.27
6	104.91	104.27
7	104.49	104.27
8	102.5	104.27
9	99.99	104.54
10	102.5	104.54
11	99.98	104.27
12	99.27	104.27
13	102.54	104.27
14	104.92	103.73
Average	102.35333	104.288

Table 3 The 3rd results of measuring the diameter

Distance	Computer Vision(mm)	Mechanism(mm)
0	102.5	104.27
1	100.27	104.27
2	102.32	104.27
3	99.16	104.27
4	102.26	104.27
5	102.5	104.27
6	102.5	104.27
7	102.5	104
8	99.04	104.27
9	102.5	104.27
10	101.26	104
11	102.5	104
12	96.87	103.73
13	100.42	103.73
14	104.59	103.19
Average	101.41	104.072

Table 2 The 2nd results of measuring the diameter

Distance	Computer vision(mm)	Mechanism(mm)
0	102.5	104.27
1	101.64	104.27
2	101.7	104.54
3	102.5	104.54
4	99.37	104.54
5	104.76	104.54
6	102.5	104.54
7	102.5	104.81
8	101.47	104.81
9	105.46	104.54
10	102.5	104.54
11	100.48	104.54
12	102.16	104.27
13	103.13	104.27
14	102.5	103.46
Average	102.34	104.432

Table 4 Average and error of results

	1st	2nd	3rd
Average of computer vision results	102.35	102.35	101.41
Standard deviation of computer vision results	1.96	1.47	1.93
Average of mechanism results	104.29	104.43	104.07
Standard deviation of mechanism results	0.19	0.32	0.31
Average error of computer vision	1.89%	2.04%	2.62%

하였다. 총 3차에 걸쳐서 실험을 진행하였으며 거리는 100 mm 간격으로 직경을 추정하였고 결과는 Table 1~3과 같다.

컴퓨터비전을 이용한 직경 측정 및 기구 메커니즘 측정 장치를 이용한 직경 측정을 총 3회 실시하였으며, 각 측정의 반복성능을 확인하였다. 기구 메커니즘 직경측정은 오랫동안 현장에서 사용 하였던 측정방법이고 정밀도 및 반복 정밀도를 신뢰할 만하다. 본

연구에서 측정된 직경 측정 결과를 하드웨어 측정 결과와 비교하였다.

Table 4의 결과에서 알 수 있듯이 기구 메커니즘 측정 장치를 이용한 직경 측정 결과는 표준편차가 매우 작고 측정 평균값이 104 mm에 수렴하여 신뢰성 있는 측정방법으로 보인다. 컴퓨터비전을 이용한 직경 측정 결과는 표준편차가 상대적으로 크고 기구 메커니즘 측정 결과와 비교하였을 때 오차율이 약 2%를 보이고 있지만 지중 관로의 파손 상태를 파악하는 데는 큰 무리가 없고, 초기 조정(calbration)을 하면 1% 이하로 줄일 수 있다고 생각한다. 측정 오차의 원인으로는 카메라 영상의 해상도가 640×480인 점, 나선형 주름관을 이차원 원에 맞춘 점, 카메라가 이동하면서 중심에서 약간 이탈할 가능성 등이 있다.

5. 결 론

지중관로를 이동하는 카메라로부터 영상을 전송받고, 영상처리

를 이용하여 지중관로의 직경을 측정하는 연구를 수행하였다.

컴퓨터비전을 통한 직경측정 결과는 기존 기구 메커니즘 직경측정 결과와 비교하여 약 2%의 오차를 보였으며, 이는 지중관로 영상의 품질에 비하여 우수한 성능을 보였다.

그리고 기존의 하드웨어 기반 직경측정 방식은 많은 전원선 및 신호선을 지중관로에 삽입하여야 하나 본 연구에서 진행한 컴퓨터 비전 직경측정 방식을 사용하면, 삽입할 선의 수가 1개로 줄어들어 직경측정에서 발생하는 여러 문제점을 줄일 수 있다.

또한 나선형 주름관은 관로 직경을 측정하기에 매우 어려운 관로이나 본 연구에서는 나선형 지중관로에 적합한 영상처리 기법들을 개발하여 측정 속도 및 기구의 단순함을 크게 향상시켰다.

따라서 해상도가 높은 카메라를 이용하고, 이동 중인 카메라를 지중관로 중심으로 안내하는 정밀한 가이드시스템을 사용한다면, 오차율을 훨씬 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Kim, D., Han, J., 2005, Development of Digital Pipeline Investigation System for Measuring Quality of Communication Underground Pipes, Proceedings of the ITFE(Information and Telecommunications Facilities Engineering) Summer Conference, 229-237.
- [2] Gonzalez, R. C., Woods, R. E., 2009, Digital Image Processing-3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- [3] Trucco, E., Verri, A., 1998, Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Pearson, London.
- [4] Akinlar, C., Topal, C., 2013, A Real-time Circle Detector with a False Detection Control, Elsevier, Massachusetts.
- [5] Sun, T., Neuvo, Y., 1994, Detail-preserving Median based Filters in Image Processing, Elsevier, Massachusetts.
- [6] Takatsu, T., Takeda, H., Ohsumi, S., Nishio, J., 1992, Development of a Measuring System for the Underground Pipelines, The 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, 767-775.