



상수도관로 위치탐사 장비개발을 위한 기초실험

Fundamental Experiment for the Development of Water Pipeline Locator

박상봉¹·김진원¹·오경석¹·김민철²·구자용^{3*}

Park, Sang-Bong¹·Kim, Jin-Won¹·Oh, Kyeong-Seok¹·Kim, Min-Cheol²·Koo, Ja-yong^{3*}

¹수자원기술주식회사, ²한국환경산업기술원, ³서울시립대학교 환경공학부

¹WARECO, ²KEITI, ³University of Seoul

ABSTRACT

A variety of methods for detecting the location of an underground water pipeline are being used across the world; the current main methods used in South Korea, however, have the problems of low precision and efficiency and the limitations in actual application. On this, this study developed locator capable of detecting the location of a water pipe by the use of an IMU sensor, and technology for using the extended kalman filter to correct error in location detection and to plot the location on the coordinate system. This study carried out a tract test and a road test as basic experiments to measure the performance of the developed technology and equipment. As a result of the straight line, circular and ellipse track tests, the 1750 IMU sensor showed the average error of 0.08-0.11%; and thus it was found that the developed locator can detect a location precisely. As a result of the 859.6-m road test, it was found that the error was 0.31 m in case the moving rate of the sensor was 0.3-0.6 m/s; and thus it was judged that the equipment developed by this study can be applied to long-distance water pipes of over 1 km sufficiently. It is planned to evaluate its field applicability in the future through an actual pipe network pilot test, and it is expected that locator capable of detecting the location of a water pipe more precisely will be developed through research for the enhancement of accuracy in the algorithm of location detection.

Key words: Extended kalman filter, Graphic Information System, Inertial Measurement Unit, Mapping system, Water supply pipelines

주제어: 확장칼만필터, 지리정보시스템, 관성센서, 위치탐사 시스템, 상수도 관로

1. 서 론

최근 사회문제로 대두된 싱크홀은 상하수도 관로의 누수가 발생 원인의 중요한 요인 중 하나로 확인되고 있어 상수도 관로의 정확한 위치 자료에 근거한 보수 및 유지관리가 절실한 실정이다. 하지만 우리나라의 상수도는 산업화, 도시화에 맞추어 급속하게 보급되었으나 각종 시설의 이력정보가 체계적으로 관리되지

않아 관련 시설의 유지관리를 위한 정보 부족 및 진단 자료의 부정확성 등으로 다양한 문제가 발생되고 있다.

상수도 시설의 유지관리를 위한 기본 자료인 관망도는 1995년부터 GIS (Graphic Information System)를 구축하고 있다. 지하시설물 GIS 구축에 있어 중요한 부분을 차지하고 있는 것이 관로 위치의 정확도이다. 이러한 위치 정확도를 높이기 위하여 먼저 기초자료를 도상에서 조사하고, 현장에서 탐사를 하여 정확한 위치를 찾아낸 다음 측량을 하고 데이터를 처리하는

Received 21 April 2016, revised 7 May 2016, accepted 9 May 2016

*Corresponding author: Koo, Jayong(E-mail : jykoo@uos.ac.kr)

pp. 225-231
pp. 233-240
pp. 241-251
pp. 253-261
pp. 265-270
pp. 271-278
pp. 279-284
pp. 285-291
pp. 293-297
pp. 299-312
pp. 313-319
pp. 321-325
pp. 327-334
pp. 335-341
pp. 343-350

방법으로 지하시설물 측량이 진행되며, 그중 가장 어렵고 불확실한 과정이 위치탐사 과정이다(Lee, 2010).

특히 1980년부터 2013년까지 광역상수도의 파손사고를 분석한 결과 약 11%가 타 공사로 인한 파손사고로 확인되어(K-water, 2015), 부정확한 GIS 관망도로 인하여 관로와 인접해 있는 타 시설물의 공사 시 상수도 관로의 위치 부정확으로 파손사고가 발생하고 있다는 사실은 상수도 관망도의 위치 정확성이 시설물의 유지관리 측면에서 매우 중요함을 확인할 수 있다.

현재 국내에서는 상수도 관로의 위치탐사를 위해 전자자유도탐사법, 지중레이더 탐사법, 음파탐사기법 등을 활용하고 있다. 그러나 주로 활용되고 있는 방법들은 그 정밀도와 효율성 등에서 신뢰성이 매우 낮으며, 비금속 관로의 증가로 인하여 현장 여건에 따른 위치탐사 기술 및 장비의 선택폭이 좁다는 한계점이 발생하고 있다. 해외의 경우, Geospatial Corporation, Smart Probe, T.D. Williamson, Inc.. XYZ Mapping 등과 같은 관로 위치탐사 기술이 개발되어 활용되고 있으나 서비스 수행 방식으로 사업을 진행하고 있기 때문에 국외의 기술을 국내로 도입하는 경우 비용적인 측면에서 효율이 매우 낮을 것으로 판단되어 관련 기술의 국산화가 시급한 실정이라고 사료된다.

따라서 본 연구에서는 상수도 관로 위치탐사와 관련된 선진기술의 벤치마킹을 통하여 상수도 관로의 위치를 탐사하고 탐사한 위치를 좌표화할 수 있는 기술 및 장비를 개발하고자 개발할 장비의 성능을 평가할 수 있는 기초실험을 수행하고 실험 결과의 분석을 통하여 개발할 장비의 현장 적용성 및 실용성을 검토하였다.

2. 위치탐사 실험장치의 구성 및 실험방법

2.1 실험장치의 하드웨어 구성

상수도 관로의 정확한 위치를 탐사하기 위한 위치탐

사 장비의 개발에서 중요한 부분을 차지하는 것은 장비의 하드웨어를 구성하는 과정으로 최적의 IMU (Inertial Measurement Unit) 센서 선정과 정확한 이동거리를 측정할 수 있는 거리측정센서를 조합하여 두 센서에서 취득된 데이터를 저장하는 제어보드를 제작하는 것이다. 본 연구에서 개발한 상수도 관로 위치탐사 장비의 구성은 다음과 같다. 지상부는 모니터 PC에 Flash Memory Reader를 포함하고 있으며, 관망부는 IMU 센서, 엔코더, 제어보드(Flash Memory 포함), 배터리 등으로 구성된다.

IMU는 3개의 가속도 센서와 3개의 자이로를 가지고 있어 이동체가 움직일 때 x, y, z 축의 가속도와 각속도를 출력한다. 가속도 값을 적분하면 속도가 되고, 두 번 적분하면 위치 값이 된다. 한편 각속도를 적분하면 이동체의 회전 방향을 알 수 있다. 이렇게 IMU에서 출력된 가속도와 각속도의 값을 항법 알고리즘으로 계산하여 이동체의 위치, 자세 및 속도를 알 수 있다(Seo et al., 2005).

자이로센서(Gyro Sensor)는 물체의 각속도를 검출하는 계측기로 방향의 측정 또는 유지에 사용되며, 각운동량 보존법칙에 근거하고 축이 어느 방향으로든지 놓일 수 있는 회전하는 바퀴이다. 가속도 센서(Acceleration Sensor)는 가속도, 진동, 충격 등의 동적 힘을 감지하며 관성력, 전기변형, 자이로 등의 응용 원리를 이용한 것이다. 가속도 센서는 물체의 운동 상태를 순시적으로 감지할 수 있으므로, 제어시스템에 있어서 필수적인 센서이다(Hyun, 2009).

Table 1은 본 연구에서 상수도관로 위치탐사 장비에 사용한 IMU 센서인 MTi IMU 센서와 1750 IMU 센서의 성능을 나타낸다. MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)기반의 MTi IMU 센서는 5백만원 정도로 가격이 비교적 저렴한 편이며, Fiber optics 기반의 1750 IMU 센서는 3천만원 이상 고가의 IMU 센서이다. Table 1에서 알 수 있듯이 1750 IMU 센서가 MTi IMU 센서보다 자이로의 정밀도가 18배 정도 높은 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Comparison between MTi IMU sensor(Xsens) and 1750 IMU sensor(KVH)

Characteristic		MTi IMU	1750 IMU
Gyro	Gyro Type	MEMS	Fiber Optics
	Bias Stability	18°/h	1°/h
	Angle Random Walk	1.5°	0.013°
	Bandwidth	450 Hz	475 Hz
Accelerometer	Input Range	5 G	10 G
	Bias Stability	0.03 m/s ²	0.07 m/s ²



Fig. 1. Locator module for the experiment.

거리 측정을 위한 주행기록계(Odometer)는 Incremental Rotary Encoder(E40S, Autonics)를 사용하였다. Incremental 방식은 측정 개시점부터 회전 각도에 대응하여 발생한 펄스를 적산하는 계수 계측방식이다. Rotary Encoder는 일반적으로 입력축의 각 변위에 따라서 1/4주기의 위상차를 가진 2상의 펄스열을 출력한다. 이 2상 펄스열의 위상관계는 회전 방향에 대응하여 반전하도록 되어 있다.

상수도 관로 위치탐사 H/W는 Fig. 1과 같으며, IMU 센서를 H/W에 탑재시킨 형태로 구성하였다.

2.2 위치보정 알고리즘

위치탐사 장비의 위치와 상태는 비선형적인 요소를 포함하고 있다. 이와 같은 비선형적인 요소를 선형으로 보정하는 과정에 확장칼만필터(EKF, Extended Kalman Filter)를 이용하였다. 확장칼만필터는 시스템

의 실제 상태와 가장 가까운 값을 직전 추정값이라고 보고 이 값을 기준으로 선형 모델을 계산하는 방법이다. 확장칼만필터를 이용하여 가속도와 각속도를 보정하고 자세를 추정하는 알고리즘은 Fig. 2와 같이 이루어진다(Kang et al., 2008).

2.2.1 자이로센서를 이용한 오일러각(roll, pitch, yaw) 계산

자이로 센서는 오일러각의 변화율($\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$)을 측정하는 것이 아니라 위치탐사장비의 각속도(p , q , r)를 측정하기 때문에 측정한 각속도를 적분해서는 오일러각을 구할 수 없다. 그러므로 자이로센서의 측정값을 오일러각의 변화률로 바꾸어서 적분해야 한다. 동역학 분야에서 오일러각과 각속도의 관계는 식 (1)과 같다(Park, Joo, 2012).

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi/\cos\theta & \cos\phi/\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (1)$$

초기값을 알고 있는 상태에서 식 (1)에 자이로의 측정 각속도(p , q , r)를 대입해서 적분하면 현재의 자세를 구할 수 있다. 각속도를 적분하여 구한 자세는 동적 움직임은 잘 알 수 있지만 오차가 점차 누적되어 실제 값에서 멀어지는 특성이 있어 자세각 측정 보다는 자세각의 동태를 측정하는데 더 유리하다.

2.2.2 가속도센서를 이용한 오일러각(roll, pitch) 계산

중력가속도로 오일러각을 계산하면 가속도센서에

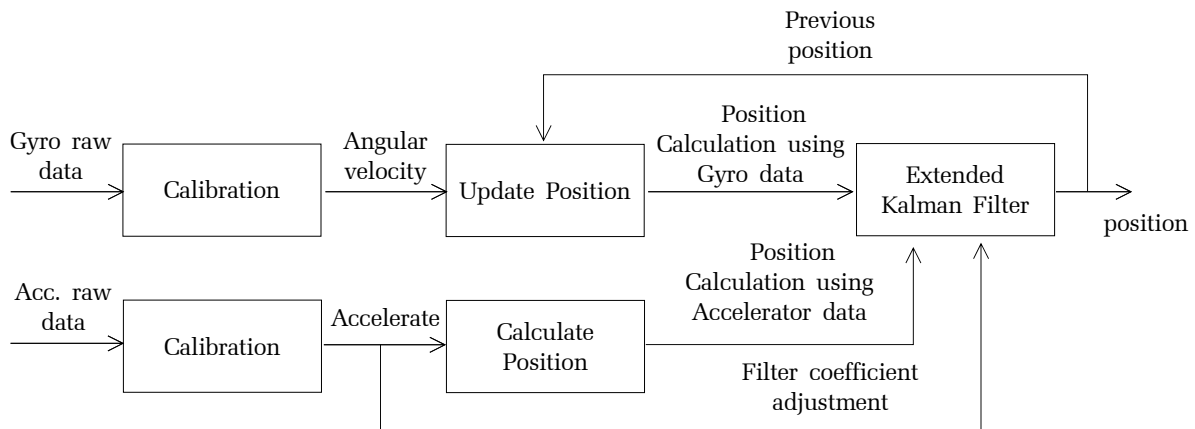


Fig. 2. Position estimation using extended Kalman filter.

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 263-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 293-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350

서 측정된 가속도(f_x, f_y, f_z)에는 중력 가속도와 속도의 크기나 방향이 바뀔 때 생기는 가속도 등 다양한 종류의 가속도가 포함되어 있다. 이를 식으로 나타내면 식 (2)와 같다(Kim, 2014).

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & w & -v \\ -w & 0 & u \\ v & -u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \sin\phi \\ -\cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 u, v, w 는 이동속도를 의미하고, p, q, r 은 회전 각속도, g 는 중력가속도를 나타낸다. 식 (2)에서 위치탐사장비가 정지해 있을 경우 이동속도(u, v, w)와 이동가속도($\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$) 모두 0이 된다. 그리고 일정한 속도로 움직일 경우 이동가속도($\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$)가 0이며, 자세의 변화가 없으니 각속도(p, q, r)도 0이 된다. 따라서 식 (3)와 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = g \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \sin\phi \\ -\cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 롤각(ϕ), 피치각(θ)의 공식을 유도하면 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{-f_y}{g \cos\theta}\right) \quad (4)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{f_x}{g}\right) \quad (5)$$

2.2.3 확장칼만필터 알고리즘

확장칼만필터의 알고리즘은 예측과정인 식 (6), (7)과 측정업데이트 과정인 식 (8), (9), (10)로 구분된다. k 번째 상태 \hat{x}_k^- 를 측정하기 위하여 $k-1$ 번째 예측된 상태 \hat{x}_{k-1} 을 비선형 함수 f 을 통해 구하며, 추정값은 식 (6)과 같다(Kim, 2014).

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}) \quad (6)$$

k 번째 오차 공분산 예측식은 식 (7)와 같다.

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (7)$$

칼만 이득 K 을 구하기 위해 식 (8)을 사용한다.

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (8)$$

식 (8)에서 구한 칼만 이득 K 를 이용하여 k 번째 예측된 상태 \hat{x}_k^- 를 갱신하면 식 (9)와 같다.

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - h(\hat{x}_k^-)) \quad (9)$$

여기서 $z_k - \hat{z}_k$ 는 오차라 하며, 실제 관측 값과 예측된 관측값의 차를 말한다.

k 번째 상태 예측이 끝나면 마지막으로 오차 공분산을 식 (10)과 같이 갱신한다.

$$P_k = P_k^- - K_k H P_k^- \quad (10)$$

2.3 실험방법

본 연구에서는 크게 2가지의 기초실험을 진행하였다. 첫 번째는 track 시험으로써, 상수도 관로 위치탐사 장비를 일정한 속도로 일정한 거리를 이동시킨 뒤 도착지점의 위치를 파악하였으며, 개발한 하드웨어와 알고리즘의 정상작동 확인과 폐합오차를 측정하여 정확도를 파악하기 위하여 실시하였다. Fig. 3은 첫 번째 실험에 사용한 트랙 3가지(직선 5 m(왕복), 원 5 m, 타원 5 m)의 제원을 나타내며, 각 트랙은 상수도 관망에 나타날 수 있는 직관 및 곡관을 모사한다. Fig. 4는 트랙에 설치한 H/W를 나타낸다.

첫 번째 실험에서는 MTi IMU 센서와 1750 IMU 센서를 구분하여 장비를 구성한 후 장비를 각각 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m를 이동시키며 위치를 측정하였다. 개발한 장비에 탑재한 센서의 정밀도를 파악하기 위하여 각 실험 조건별 반복 실험을 10회 진행하였으며, 통계적 오차 및 신뢰수준을 분석하였다.

두 번째는 road 시험으로써, 장거리 구간을 이동하며 위치를 탐사하는 경우를 모사하였다. 이를 위하여 IMU 센서를 탑재한 위치탐사 프로브 H/W를 이동대차에

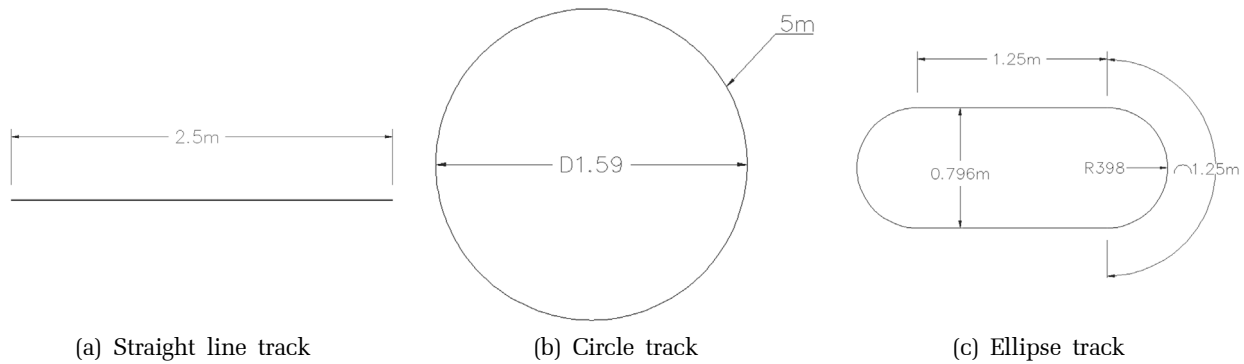


Fig. 3. Specification of track test.

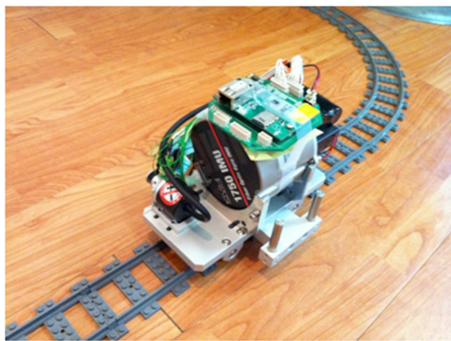


Fig. 4. Locator for track test.



Fig. 5. Locator for road test.

탐재시킨 장비를 제작하였으며, 제작한 H/W는 Fig. 5와 같다. Road 시험 장소는 K-water Y정수장 구내 도로였으며, 먼저 정밀한 GPS 측량 장비를 이용하여 측량을

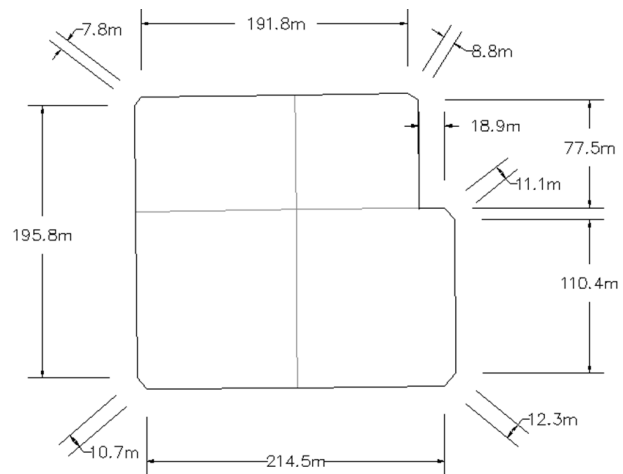


Fig. 6. Layout of the road test.

실시하고 이를 도면상에 표기하였다. 거리는 859.6 m이고 고저차가 있는 부지에서 이동에 따른 3차원(X, Y, Z)의 공간 위치탐사 실험을 실시할 수 있다. Fig. 6은 Road Test 실험 부지의 모식도를 나타낸다.

실험 방법은 위치탐사 장비의 이동속도를 다르게 하여 속도의 변화에 따른 오차의 크기 변화와 정밀측량 결과와 비교하여 정밀도를 확인하기 위한 실험을 병행하여 실시하였다. 이동 속도는 상수도 관망에서 나타날 수 있는 속도 중 최저 및 최대 유속을 모사하여 느린 속도(0.3 m/sec ~ 0.6 m/sec), 중간 속도(1.0 m/sec ~ 1.5 m/sec), 빠른 속도(2.0 m/sec ~ 2.5 m/sec)의 속도로 각 10회씩 실시하여 구간마다 GPS 측량결과와 오차를 측정하였다. 거리 측정 오차를 최소화하기 위하여 바퀴의 미끄럼이 최소화 되도록 이동대차를 제작하여 장거리 위치탐사 실험을 실시하였다. 마지막으로, 실험 결과의 분석은 track 시험에서와 동일한 방법을 이용하였다.

pp. 225-231
pp. 233-240
pp. 241-251
pp. 253-261
pp. 263-270
pp. 271-278
pp. 279-284
pp. 285-291
pp. 293-297
pp. 299-312
pp. 313-319
pp. 321-325
pp. 327-334
pp. 335-341
pp. 343-350

3. 기초실험 및 결과

3.1 Tract test 단거리 기초실험

실험방법은 레일의 한 점에서 출발하여 다시 제자리로 돌아오게 한 후 저장된 데이터를 가지고 분석하였다. 먼저 MTi IMU 센서의 이동거리별 실험 결과는 Table 2와 같이 나타났다.

실험 데이터를 분석한 결과, 첫째로 직선운동의 폐합오차 결과는 이동거리 대비 최소 0.19 %에서 최대 0.49 %이고 평균 0.34 %의 오차를 보였으며, 둘째로 원운동의 폐합오차 결과는 최소 0.37 %에서 최대 0.66 %이고 평균 0.51 %의 오차를 나타내었다. 셋째로 타원운동의 폐합오차 결과는 최소 0.33 %에서 0.63 %이고 평균 0.48 %로 나타났다. 한편, 10회 반복 측정에 대하여 95 % 신뢰구간을 설정한 뒤 실험 결과가 95 % 신뢰구간에 포함된 적중률(Hit ratio)은 직선 track의 경우 60~80 %로 나타났으나,

원 track과 타원 track은 50~60 %로 다소 낮게 나타났다. 다음 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 각각 직선, 원, 타원일 때의 이동거리별 폐합오차를 나타낸 그래프이다.

1750 IMU 센서를 활용하여 track 시험을 실시한 실험 결과는 Table 3과 같다.

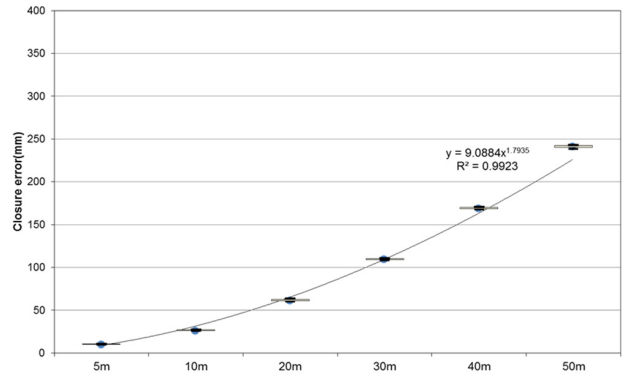


Fig. 7. The closure error of straight line track test (MTi IMU).

Table 2. Closure error on moving distance (MTi IMU)

Moving distance(m)	Closure error								
	Straight line			Circle			Ellipse		
	Mean (mm)	95 % Confidence interval (mm)	Hit ratio (%)	Mean (mm)	95 % Confidence interval (mm)	Hit ratio (%)	Mean (mm)	95 % Confidence interval (mm)	Hit ratio (%)
5	10.29	9.91~10.67	80	19.24	18.79~19.69	60	17.53	17.07~17.99	60
10	26.46	25.95~26.97	70	40.88	40.18~41.58	60	39.35	38.50~40.20	60
20	61.65	60.56~62.74	70	98.81	98.07~99.55	60	90.23	89.14~91.32	60
30	109.53	108.87~110.19	70	159.88	159.10~160.66	60	151.03	149.77~152.29	50
40	169.29	168.52~170.06	60	233.02	230.33~235.71	50	219.38	217.45~221.31	60
50	241.32	240.01~242.63	60	325.86	323.54~328.18	50	304.32	298.86~309.78	50

Table 3. Closure error moving distance (1750 IMU)

Moving distance(m)	Closure error								
	Straight line			Circle			Ellipse		
	Mean (mm)	95 % Confidence interval (mm)	Hit ratio (%)	Mean (mm)	95 % Confidence interval (mm)	Hit ratio (%)	Mean (mm)	95 % Confidence interval (mm)	Hit ratio (%)
5	3.00	2.82~3.18	90	6.01	5.81~6.21	70	5.08	4.85~5.31	70
10	8.00	7.75~8.25	80	14.16	13.86~14.46	70	11.04	10.82~11.26	70
20	17.00	16.78~17.22	80	26.13	25.86~26.40	70	23.06	22.88~23.24	80
30	25.13	24.82~25.44	80	37.05	36.79~37.31	70	32.06	31.82~32.30	70
40	42.16	41.76~42.56	80	58.15	57.86~58.44	70	51.14	50.67~51.61	70
50	54.00	53.64~64.36	70	65.11	64.85~65.37	70	61.11	60.86~61.36	70

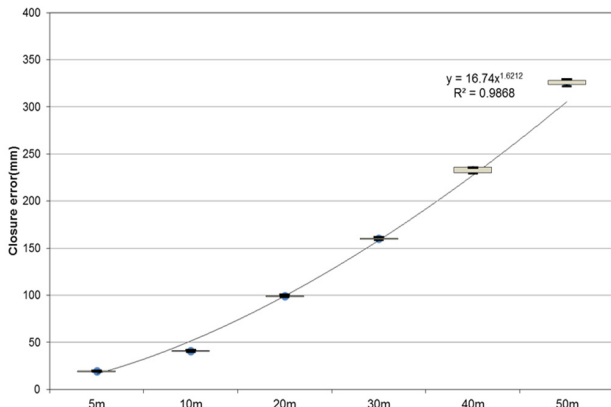


Fig. 8. The closure error of circle track test (MTi IMU).

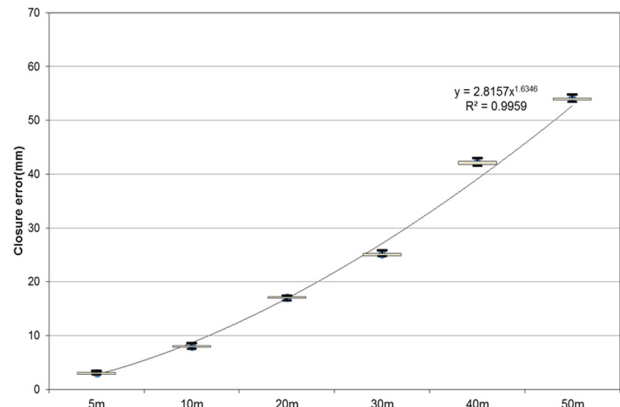


Fig. 10. The closure error of straight line track test (1750 IMU).

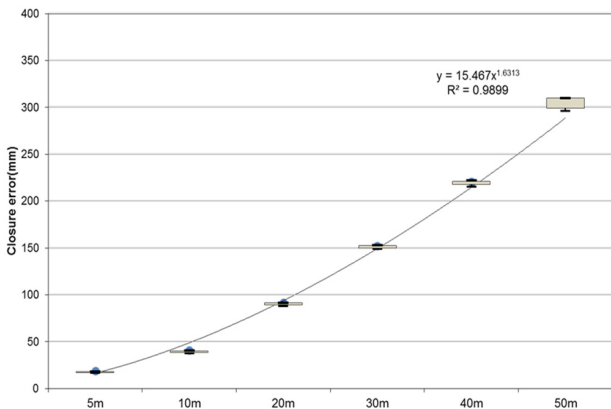


Fig. 9. The closure error of ellipse track test (MTi IMU).

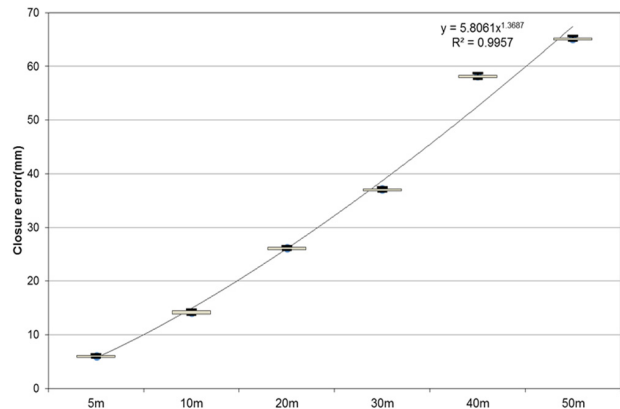


Fig. 11. The closure error of circle track test (1750 IMU).

1750 IMU 센서의 경우는 첫째로, 직선운동의 폐합오차 결과는 이동거리 대비 최소 0.05 %에서 최대 0.11 %이고 평균 0.08 %의 오차를 보였으며, 둘째로 원운동의 폐합오차 결과는 최소 0.11 %에서 최대 0.15 %이고 평균 0.13 %의 오차를 나타내었다. 셋째로 타원운동의 폐합오차 결과는 최소 0.09 %에서 0.13 %이고 평균 0.11 %로 나타났다. 10회 반복 측정에 대하여 95 % 신뢰구간을 설정한 뒤 실험 결과가 95 % 신뢰구간에 포함된 적중률(Hit ratio)은 앞선 MTi IMU 센서를 이용할 때보다 전반적으로 높게 나타났다. IMU 센서는 이동거리가 길어질수록 오차가 커지는 경향이 있다. 장거리 측정시 측정의 신뢰성을 보장하기 위해서는 MTi IMU 센서보다 1750 IMU 센서를 이용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 다음 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 각각 직선, 원, 타원일 때의 이동거리별 폐합오차를 나타낸다.

Track test 결과 두 센서 모두 직선운동이 가장 오차가 낮게 나타났으며, 타원은 중간, 원운동의 경우가

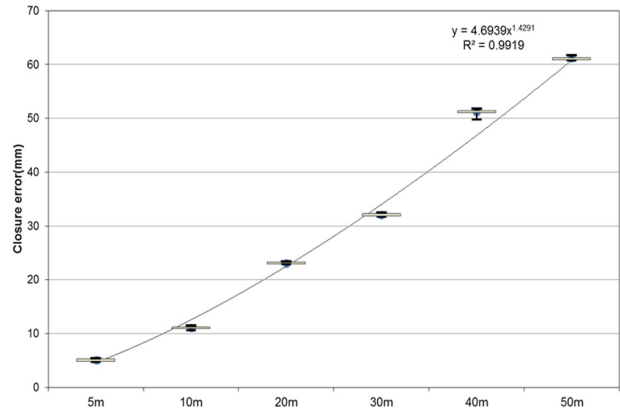


Fig. 12. The closure error of ellipse track test (1750 IMU).

가장 높게 나타났다. 이는 실 상수도 관망에서 곡관이 많을수록 오차율이 높게 나타날 수 있음을 알 수 있는 기초 실험이다.

두 센서의 정밀도의 차이는 MTi IMU 센서의 경우 폐합오차가 평균 0.34 %~0.51 %로 1 km 위치탐사 시

pp. 225-231
pp. 233-240
pp. 241-251
pp. 253-261
pp. 265-270
pp. 271-278
pp. 279-284
pp. 285-291
pp. 293-297
pp. 299-312
pp. 313-319
pp. 321-325
pp. 327-334
pp. 335-341
pp. 343-350

최대 5 m 정도의 오차가 발생될 수 있으며, 1750 IMU의 경우는 평균 0.08 %~0.13 %의 오차로 1 km 위치탐사 시 1 m 정도로 정밀도가 높음을 확인하였다. 단 거리 구간의 두 IMU 센서의 정밀도는 약 5배 정도인 것을 확인할 수 있었다.

IMU 센서는 시간이 경과할수록 누적오차가 점점 커지게 되는 특성을 가지고 있으므로 MTi IMU 센서는 장거리 구간 적용 시 오차가 더욱 커질 것으로 판단된다.

3.2 Road Test 장거리 공간 기초실험

Road test에서는 track test 결과, 정밀도가 낮아 1 km 이상 장거리 위치탐사 시 5 m이상의 큰 오차가 발생할 것으로 예상되는 MTi IMU 센서는 사용하지 않았으며, 1750 IMU 센서를 탑재한 위치탐사 프로브 H/W를 이동대차를 이용하여 장거리 공간 기초실험을 실시하였다. 각 이동속도별 위치탐사 결과는 Table 4와 같다.

실험 결과 XY 방향의 평균 폐합오차는 느린 속도에서는 0.32 m, 보통 속도에서는 0.38 m, 빠른 속도에서는

0.56 m로 나타났다. 오차율은 느린 속도에서 빠른 속도로 갈수록 높게 나타남을 확인할 수 있었으며, 이는 바퀴의 슬립 등 거리 측정에 오차가 발생하여 폐합오차도 증가하는 것으로 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과 분석을 통해 정밀도가 높은 위치탐사를 위해서는 1.0 m/sec 전후의 속도가 가장 적합한 것으로 확인할 수 있었으며, 거리 측정 오차를 줄인다면 더욱 정밀한 위치탐사가 가능할 것이다. 또한 Z 방향의 평균 폐합오차는 0.034 m로 거의 오차 발생이 나타나지 않았으며, 실험 결과를 그래프로 나타내면 Fig. 13과 같다

4. 결 론

본 연구에서는 상수도 관로의 정확한 위치를 탐사하기 위한 위치탐사 장비를 개발하고, 위치탐사의 정확도를 높이기 위하여 측정된 위치 데이터는 확장칼만필터를 이용하여 보정하였다. MEMS 기반의 MTi IMU 센서와 Fiber Optics 기반의 1750 IMU 센서를 사용하여 위치탐사 장비의 성능을 확인하기 위한 track 시험과 road 시험을 실시하였다.

첫째로, 상수도 관로에서 나타날 수 있는 모든 직관 및 곡관에 대응할 수 있도록 직선, 원, 타원 형태로 5 m 길이의 Track 모형실험 장치를 만들어 누적거리를 증가시키면서 반복 주행을 하여 발생하는 오차의 정밀도를 확인하였다. MTi IMU 센서를 이용한 시험 데이터를 분석한 결과, 직선 Track의 모형실험 결과는 이동거리 대비 평균 0.34 %의 오차를 보였으며, 원형 Track의 실험 결과는 평균 0.51 %의 오차를 나타내었다. 또한 타원 Track의 실험 결과는 평균 0.48 %로 나타났다. 따라서 직선 구간의 이동보다 방향 변경이 발생하는 원형 또는 타원 구간에서 오차가 커짐을 확인할 수 있었으나 오차의 차이는 1 m 이동 시 2 mm로 실용성 측면에서는 차이가 없을 것으로 판단된다.

한편 1750 IMU 센서를 이용한 시험 데이터를 분석한 결과, 직선 Track의 모형실험 결과는 이동거리 대비 평균 0.08 %의 오차를 보였으며, 원형 Track의 실험 결과는 평균 0.13 %, 타원 Track의 실험 결과는 평균 0.11 %로 나타났다. 따라서 1 km 거리의 상수도 관로를 위치탐사하면 MTi IMU 센서는 약 5 m, 1750 IMU 센서는 약 1 m 정도의 오차가 발생할 수 있어 1750 IMU 센서가 5배 정도로 정밀함을 확인할 수 있다.

Table 4. Closure Error velocities at a road test

Movement speed (m/sec)	Closure error(m)		
	Mean (m)	95 % Confidence interval (m)	Hit ratio (%)
Slow (0.3 ~ 0.6)	0.31	0.28 ~ 0.35	80
Medium (1.0 ~ 1.5)	0.37	0.33 ~ 0.40	70
Fast (2.0 ~ 2.5)	0.56	0.53 ~ 0.59	70

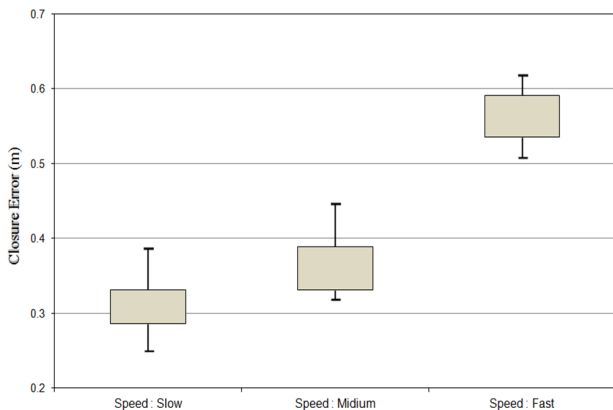


Fig. 13. The Closure error of the road Test.



둘째로, 이동대차를 제작하여 859.6 m의 Road에서 GPS 정밀 측량 결과와 1750 IMU 센서를 이용한 위치 탐사 결과를 비교하여 오차의 정밀도를 확인하는 실험과 주행 속도를 변화하면서 최적의 이동속도를 확인하는 실험을 실시하였다. 위치탐사 결과는 이동거리 대비 평균 0.04 %의 오차의 정밀도를 나타내었다. 또한 위치탐사 장비의 이동속도를 변화시키면서 최적의 이동속도를 확인한 결과 장비의 이동속도가 빠를수록 정밀도가 낮아지는데 이는 거리측정 장치의 오차가 증가할수록 정확도도 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 다만 이와 같은 결과는 트랙이동시 속도에 따른 흔들림 현상으로 판단되지만 실제 상수도 관로 내에서는 흔들림 현상이 억제될 수 있으므로 개발된 장치의 실용성을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구를 통해 상수도 관로 위치탐사를 위한 위치탐사 센서는 이동거리 및 방향 전환시의 오차 발생 특성 등을 종합적으로 고려할 때 장거리 위치탐사 시 측정의 신뢰성을 보장하기 위해서는 저가의 MTi IMU 센서보다는 정밀도가 높은 1750 IMU 센서를 선택하는 것이 적정할 것으로 판단된다.

향후 현장의 적용성과 정밀도 향상을 위하여 실제 상수도 관로 형태의 Pilot Plant를 통하여 매설 환경과 타 지하매설물의 영향 여부를 확인하고, 위치탐사 알고리즘의 업그레이드를 통하여 상수관로 탐사의 정확도 및 현장 적용성을 높일 수 있는 연구를 추진한다면 더욱 정확한 상수도 관로의 위치를 탐사할 수 있는 장비를 개발할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 환경부 “차세대 EIS사업(코드번호 : GT-11-G-02-001-4)”의 지원으로 행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Hyun, D.J., (2009), Development of Self-contained Navigation System with Optical Navigation Sensor and MEMS Inertial Sensor, Doctor's Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea.
- Kang, C.W., Yoo, Y.M., Park, C.G., (2008), Performance Improvement of Attitude Estimation Using Modified Euler Angle Based Kalman Filter, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 14(9), 881-885.
- Kim, S.P., (2014), Essential Kalman Filter, A-Jin Publishing, Korea.
- K-water, (2015), Validation review of optimal renewal period for multi-regional water supply pipelines, K-water, Daejeon, Korea.
- Lee, B.W., (2010), Improving the Detection Rate of the Water Mains Underground Facilities, Master's Thesis, The University of Seoul, Seoul, Korea.
- Park, H.J., Joo, Y.M., (2012), Evaluation of Spray Flight Attitude for Agricultural Roll-balanced Helicopter using Kalman Filter, J. of Biosystems Eng. 37(6), 342-351.
- Seo, J.W., Lee, H.S., Lee, J.G., Park, C.G., No, Y.W., (2005), A Location Measurement of Underground Pipeline Using an Inertial Navigation System and GPS, The 12th GNSS Workshop.

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 263-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 293-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350