



IMU를 활용한 보일러 튜브 및 배관 스캐너 위치 추적

Location Tracking of Boiler Tube and Pipe Inspection Scanner Using IMU

박주현¹, 서정석¹, 정계조^{1,#}
Ju-Hyeon Park¹, Jung-Seok Seo¹, and Gye-Jo Jung^{1,#}

¹ 한국전력공사 전력연구원 발전기술연구소 (Power Generation Laboratory, Research Institute, Korea Electric Power Corporation)
Corresponding Author / E-mail: keprica.jung@kepco.co.kr, TEL: +82-42-865-5691
ORCID: 0000-0003-4498-4358

KEYWORDS: Inertial measurement unit (관성 측정 장치), Indoor positioning system (실내 위치 확인시스템), Kalman filter (칼만 필터)

This paper proposes an IMU method for location tracking in power plants and indoor environments without GPS. IMU-based sensors use accelerometer, angular accelerometer, earth magnetometer, and altimeter. It is a method for recognizing the movement of pedestrians or moving objects. However, errors can be caused, as noise and bias increase due to long-term measurement. VIO-SLAM type sensor T265, which uses a combination of cameras and IMU, and can accurately track paths in invisible spaces, is used in this study. In addition, this type of sensor can be corrected in real time with a filter function inserted into the sensor and errors can be minimized. As a comparison experiment with the encoder, it is possible to evaluate the location of the scanner within a ± 10 mm error from the actual distance in $1,500 \times 700$ (mm) space. The usefulness of this method is verified by measuring real specimens of boiler pipes and tubes, which are the major components of power plants.

Manuscript received: August 12, 2021 / Revised: October 5, 2021 / Accepted: October 6, 2021

1. 서론

발전소는 주기적으로 보일러 튜브 및 배관들을 점검하기 위하여 계획 예방 정비 기간에 전문기관과 비파괴검사기관을 통해 검사 및 정비를 수행한다. 발전소 특성상 운전 시 취약했던 부분을 중점적으로 검사하거나 과거 정비 이력의 고장사례들을 재점검하여 주요 부품의 수명을 판단한다. 하지만 주요 부품의 정비를 위하여 보일러 전체를 검사할 경우 범위가 방대할 뿐만 아니라 튜브의 경우 방대한 수량으로 인하여 손상과 수명 진단 데이터와 부품의 위치를 결정하는데 많은 비용과 시간이 소요된다. 스캐너를 통한 주요 부품에 접근하고, 이상 상태 검사 데이터와 부품의 위치를 동시에 매핑하는 것은 정비 효율을 향상시킬 수 있는 중요한 방법 중 하나이다. 이는 발전소 내부의 취약한 부분을 한눈에 파악할 수 있고, 과거 검사 이력을 비교 점검하여 신속하게 예방정비의 조치를 취할 수 있다. 하지만 GPS (Global Positioning System)가 없는 발전소 내부 및 실내

에서 스캐너나 부품의 위치를 결정하는 것은 여러가지 환경적 제약이 있다. 현재 IPS (Indoor Positioning System)으로 활용되고 있는 Finger Printing¹ 방법은 서비스 지역에서 실내 공간을 작은 셀로 나누고, 사용자 위치에서 수신된 참조 위치와 유사한 신호 패턴을 보이는 셀을 추적하여 위치를 결정한다. 이는 삼각측량법보다 정확도가 높지만 벽, 장애물 등에 신호 감쇠가 일어날 수 있고, 발전소의 공간 특성상 장애 요소가 많고 협소한 부품에서 위치를 추적하기는 힘들다. 또한, 블루투스 기반의 Beacon² 방식은 스마트폰을 이용한 실내 측위 기술로 널리 이용되고 있지만 신호 도달 범위가 짧고, 다량의 Beacon을 설치해야하는 단점이 있다. Dead Reckoning³은 이동체의 속도 및 주행 방향을 계산하여 다음 위치를 추정하는 기법이다. 하지만 이동시간이 늘어날수록 오차가 누적되어 커진다는 점에서 최초 위치를 감지하기 어려운 단점이 있다. Geo-Magnetism⁴은 사용자가 이동하면서 발생하는 자기장의 변화 트렌드를 미리 구축된 지자기 장패에 매칭하는 방법으로 위치 추정이 가능하다. 하지만 철골

구조물, 전자장비 등에 의해 위치 추정 정보가 왜곡된다. 상술한 바와 같이 실내 위치 추적 기법들에 대한 연구가 이루어지고 있지만 실제 구현 시 장단점이 나타날 수 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위하여 두 가지 방법을 융합하여 예측하거나 해당 위치를 연속으로 보정해주는 필터를 적용하면 정확한 위치추적이 가능하다. 현재 관성을 이용한 IMU (Inertial Measurement Unit) 센서를 융합 및 예측기술에 의한 해결책으로 활용되고 있다. IMU 센서는 가속도와 각속도 정보를 적분하면 속도(Velocity) 및 거리(Translation)를 계산할 수 있다. 하지만 장시간 사용에 의한 노이즈 및 바이어스가 증가함에 따라 오차가 발생할 수 있다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 가속도계와 각속계를 융합하는 보상 필터(Complementary Filter) 또는 칼만 필터(Kalman Filter)를 사용함으로써 오차를 최소화할 수 있다. 또한, EKF (Extended Kalman Filter) 및 UKF (Unscented Kalman Filter) 등의 비선형 칼만 필터⁵를 통하여 추정값을 추출할 수 있고, 이에 따라 이동 경로를 예측할 수 있기 때문에 실제 위치와 비교할 수 있다.

한편, IMU가 장착된 INS (Inertial Navigation System) 기술은 유인 항공기, 미사일, 선박, 잠수함, 위성과 같은 항법^{6,7}과 통제⁸의 핵심 역할을 이루고 있다. 또한, IMU는 무인시스템의 안내와 제어에 있어 필수적이며, 의학⁸ 및 스포츠 분야⁹에서는 IMU 센서를 팔이나 다리의 관절에 부착하여 자세 교정을 하거나 선수들의 움직임 상태를 분석하는 연구가 이루어지고 있다. 따라서, 실시간으로 위치를 보정해주며 경로를 예측할 수 있는 IMU를 활용하면 GPS없이도 실내에서 위치를 결정하며 추정할 수 있다. 본 논문에서는 GPS가 없는 발전소 및 실내환경에서 동작 가능한 T265 IMU 센서를 이용하여 스캐너의 위치를 추적할 수 있는 방법을 제안한다. 상기 센서를 활용하여 실시간으로 위치를 모니터링할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 스캐너의 정확한 위치를 검증하기 위하여 엔코더와 비교 실험을 진행하였다. 또한, 발전소의 주요 부품인 보일러 배관과 튜브에 대하여 스캐너의 위치를 확인하였다.

2. IMU 센서

IMU는 항법 목적 외에도 많은 소비자 제품에서 방향 센서 역할을 한다. 현재 모든 스마트폰과 태블릿 등 전자기기에는 IMU가 방향 센서로 포함되어 있다. 또한, 가상 현실 공간의 헤드셋, PSP 및 닌텐도 Wii의 컨트롤러와 같은 일부 게임 시스템은 사람의 움직임을 측정할 때도 IMU를 사용한다. 이와 같이 IMU의 기본 구성요소는 3차원 공간에서 이동체의 방향, 속도, 자세 및 움직임을 측정하기 위하여 가속계, 각속도계, 지자계 센서를 사용한다. 가속도계는 속도의 변화를 알 수 있고, 각속도계는 회전 방향을 감지하고, 이동체의 롤(Roll), 피치(Pitch), 요(Yaw) 등을 측정한다. 여기서 가속도계는 시간에 따른 속도의 변화를 나타내며, X, Y, Z에 대한 선형 가속도 즉, 진행 방향, 횡 방향, 높이 방향의 가속도를 측정할 수 있다. 하지만 가속도

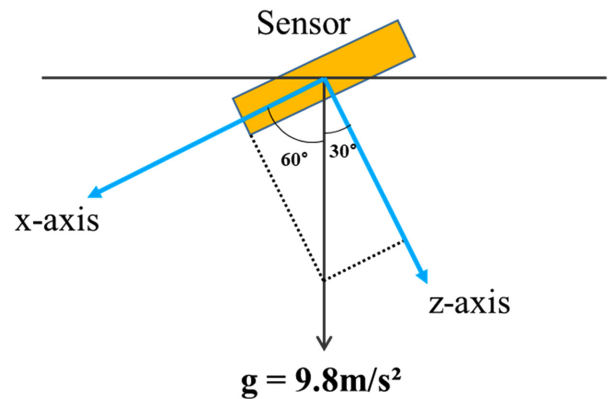


Fig. 1 Principle of accelerometer

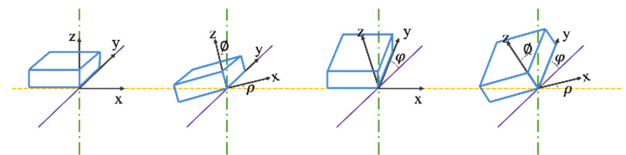


Fig. 2 3-Axis accelerometer of MPU-6050 type

센서는 정지한 상태에서 지면과 수직 방향의 중력을 받게 된다. Fig. 1은 정지한 상태의 센서가 X축으로 30도로 기울어진 상태를 나타낸다. 이때 가속도 센서의 기울기(θ)는 식(1)과 식(2) 과정을 통하여 구할 수 있다.¹⁰

$$\frac{A_x}{A_z} = \frac{1g \times \sin(\theta)}{1g \times \cos(\theta)} = \tan(\theta) \tag{1}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{A_x}{A_z} \tag{2}$$

또한, 상술한 식에 의하여 Fig. 2와 같이 정지한 상태에서 3축 가속도 센서(MPU-6050)의 기울기를 통하여 자세를 결정할 수 있다. 각 축을 기준으로 ρ, φ, θ만큼 기울어져 있으며, 삼각함수를 이용하여 각 축에 대한 기울어진 각도를 식(3)부터 식(5)로 구할 수 있다.¹¹ 즉, 회전각을 3축으로 나누어 표현할 때 측정된 가속도값은 X축 주위로 회전한 각도(ρ)와 Y축 주위로 회전한 각도(φ)로 계산할 수 있다. 여기서, ρ와 φ는 각각 Roll과 Pitch를 나타내고, θ는 Z축의 중력에 대한 회전각이므로 Yaw는 가속도계로부터 계산할 수 없다.

$$\rho = \tan^{-1} \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \tag{3}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \tag{4}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}{A_z} \tag{5}$$

한편, 자이로 센서는 라틴어로 회전이라는 뜻으로 회전하는

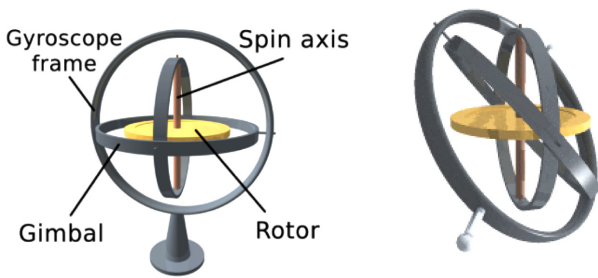


Fig. 3 Configuration of gyroscope sensor

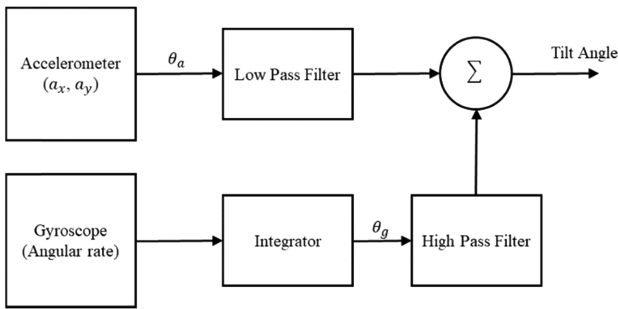


Fig. 4 Block diagram of complementary filter

물체의 회전각을 감지하는 센서이다. 이 센서는 시간 단위당 각도의 변화량인 각속도를 나타내고, 단위는 degree/sec를 사용한다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 자이로스코프는 Frame과 Gimbal, 회전축 그리고 Rotor로 이루어져 있다. Rotor가 기준이 되고, 회전운동에 대한 Frame의 변화를 통하여 방향각을 관찰할 수 있다. 자이로스코프는 수직인 조건에 상관없이 가속도 센서로 측정할 수 없는 모든 방면에 대한 각도의 변화를 측정할 수 있다. 이러한 원리에 의하여 자이로 센서는 시간이 경과된 후 (Δt) X, Y, Z축 주위를 회전하는 각속도(ω)를 측정하며, $\omega \times \Delta t =$ 각도 변화량으로 산출할 수 있다. 하지만 측정된 방향각은 시간의 흐름에 따라 각도가 누적되어 바이어스가 발생할 수 있다. 이 현상을 드리프트라고 하며, 드리프트가 발생하게 되면 방향각에 대한 정확도가 낮아질 수 있다.

3. 오차 보정 필터

상술한 바와 같이 IMU로부터 출력되는 가속도계와 각속도계를 따로 사용할 경우 둘 다 구조적인 오차가 발생할 수 있다. 가속도계는 긴 시간 동안의 중력에 대한 정확한 기울기를 제공하지만, 신호의 노이즈가 많고 각속도계는 짧은 시간 동안의 정확한 방향각 변화를 보여주지만, 시간의 흐름에 따라 바이어스가 발생한다. 보상 필터¹²는 가속도 및 자이로 센서의 부족한 부분을 서로 보충하여 추출하는 방법으로서 가속도는 저주파 영역에서 응답 특성이 좋고, 자이로는 고주파 영역에서 응답 특성이 좋은 것을 활용하여 LPF (Low Pass Filter) 및 HPF (High Pass

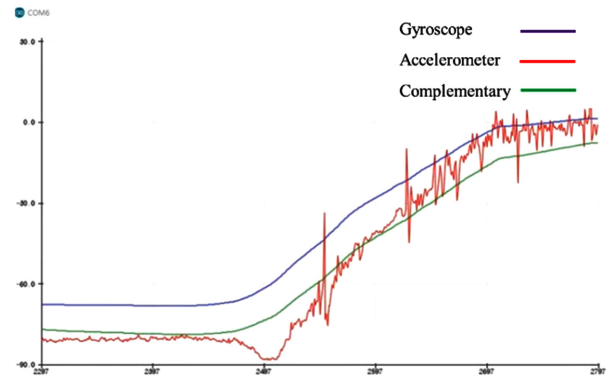


Fig. 5 Example of complementary filter result

Filter)를 혼합하여 사용한다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 자이로는 적분한 데이터에서 HPF로 고주파 영역에서만 필터링하고, 가속도는 LPF를 통하여 저주파 영역에서 필터링한 값을 서로 더하여 새로운 각도를 추출한다. 따라서, 보상 필터의 식(6)에 의하면 자이로 센서의 각속도를 측정하여 적분한 값을 가속도 센서의 절대각으로 보상받게 된다.

$$\theta = \frac{1}{s}(\theta'_g - (K_p + \frac{1}{s}K_i)(\theta - \theta_a)) \tag{6}$$

Fig. 5는 보상 필터를 실제 적용한 결과를 나타낸다. 가속도 같은 경우 노이즈가 많이 유입되는 것을 확인할 수 있고, 자이로 센서의 경우 시간에 따라 바이어스가 누적되는 것을 볼 수 있다. 이의 장단점을 보완한 보상 필터를 통하여 적용한 데이터는 시간의 흐름에 따라 오차를 최소화하였고, 정확한 각도를 추정할 수 있다.¹³

한편, 칼만 필터는 잡음이 포함되어 있는 측정값을 바탕으로 선형 역학계의 상태를 추정하는 재귀 필터로, 1960년대 초 루돌프 칼만이 개발하였다. 이 방법은 대상시스템의 확률적인 모델과 측정값을 이용하여 시스템의 상태변수를 찾아내는 최적 추정기법으로 컴퓨터 비전, 로봇, 로켓, 위성 및 미사일 등 사용된다.¹⁴⁻¹⁶ 즉, 상태식에 의한 시간전파와 측정식에 의한 개선을 통하여 상태값을 추정하게 되며, 실제 상태값과 추정된 상태값의 오차 공분산을 최소화하는 알고리즘이다. 시스템이 선형이고, 정규분포를 갖는 백색 잡음에 의해 구동되는 칼만 필터는 최소 공분산을 갖는 편향되지 않는 최적의 추정기로 알려져 있다. 칼만 필터의 추정값에 대한 확률분포를 따져서 가장 확률이 높은 값을 추정값으로 선택하는 방법으로 칼만 필터는 측정값의 예측 오차로 예측값을 적절히 보정해서 최종 추정값을 계산한다.¹⁷ 따라서, 칼만 이득을 통한 각각의 결과로 나타나는 상태를 위한 최적의 평균 인자를 찾는 것이 칼만 필터의 목표이다. 다음 식(7)과 식(8)은 시스템의 상태방정식을 나타낸다. 여기서 A는 상태 위치 모델, B는 입력 모델이며, u는 입력, w는 시스템 노이즈이고, H는 측정 모델, v는 측정 노이즈이다. 위의 상태 방정식에서 시스템 노이즈 w와 측정 노이즈 v의 확률분포는 식(9)와 식(10)과

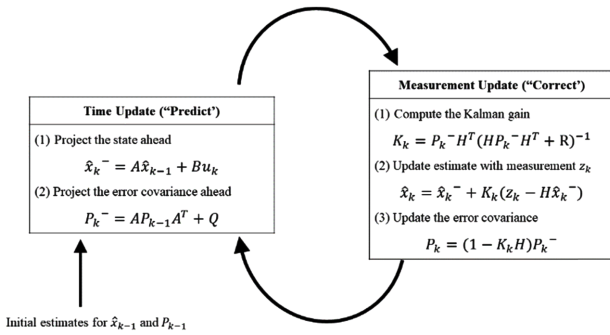


Fig. 6 Block diagram of kalman filter

같다. 평균은 모두 0이고, 편차는 각각 Q와 R이다. 칼만 필터는 원본 신호의 평균값과 편차를 활용하여 추정이 가능하다.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \tag{7}$$

$$z_k = Hx_k + v_k \tag{8}$$

$$w_k = N(0, Q_k) \tag{9}$$

$$v_k = N(0, R_k) \tag{10}$$

칼만 필터와 보상 필터의 기본적인 개념은 1차 저주파 통과 필터(LPF)라는 점에서 동일하다. 하지만 보상 필터는 LPF와 HPF의 가중치가 고정되어 있는 반면에 칼만 필터는 예측값과 측정값에 적절한 가중치를 곱하여 두 값을 더해 최종 추정값을 계산하게 되는데, 가중치값은 칼만이득(K)으로 칼만 필터의 알고리즘을 반복하면서 칼만 이득값은 새로 계산된다. 즉, 추정값을 계산하는 이득값이 매번 다시 조정되는 것이 보상 필터와 칼만 필터의 차이로써, 칼만 필터는 변화되는 이득값으로 인해 보상 필터보다 응답 특성이 빠르다. 따라서, 이동체에 발생하는 오차를 최소화할 수 있는 필터를 사용하거나 실시간으로 경로를 예측할 수 있는 IMU를 활용하면 정확한 위치를 결정할 수 있다.

4. 실험 및 고찰

본 연구에서는 VIO-SLAM 방식의 T265 센서에서 카메라를 제외한 IMU만의 정보를 활용하였다. Intel사 T265 IMU 센서는 VPU (Visual Processing Unit)에서 저전력으로 동작할 수 있도록 설계되었고, GPS 없는 환경에서 이동체의 자세값, 속도, 위치 및 회전각 등을 통하여 움직이는 거리를 측정할 수 있다. 또한, 다양한 조건에서 테스트 및 검증되었으며 1% 미만의 폐쇄 루프 드리프트를 제공한다. Fig. 7은 검사 스캐너에 T265를 부착한 모습을 나타낸다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 스캐너 진행 방향(X축)의 Translation 값을 감지할 수 있도록 측면에 부착

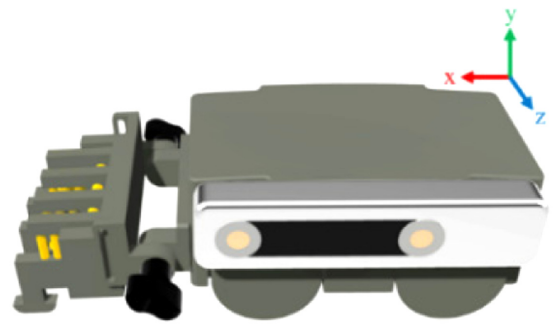


Fig. 7 Attaching the IMU sensor to the scanner

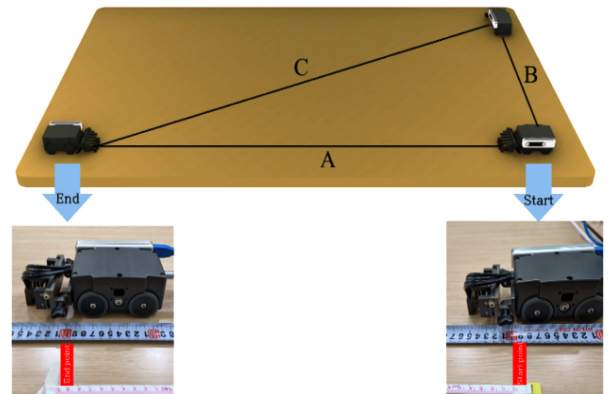


Fig. 8 Diagram of IMU and encoder comparison measurement

하였다. Fig. 8은 IMU와 엔코더 비교 측정 실험 개념도를 나타낸다. 회의실 탁자 길이를 고려하여 A는 1,500, B는 700, C는 1,750 mm의 거리를 손을 밀며 실험을 진행하였다. 실험은 전용 USB 케이블을 연결하여 엔코더의 정방향으로 5회 반복 측정하였다. 또한, IMU와 엔코더를 비교 측정할 수 있는 소프트웨어를 개발하여 측정하면서 동시에 오차를 비교하였다.

Table 1 및 Fig. 9는 엔코더(Nidec사 RE12D200-201-1)와 T265 IMU 센서의 실제 거리 A(1,500 mm), B(700 mm), C(1,750 mm) 기준으로 측정 거리, 평균값 및 오차를 나타낸다. 실제 이동거리는 수동 오차로 인하여 반복 측정값에 대한 평균으로 판단하였다. 엔코더는 거리에 따라 Calibration을 진행하였고, T265는 원점에서 항상 Reset을 하여 측정된 거리가 누적되지 않도록 하였다. 엔코더 및 T265를 비교한 실험 결과에 따르면 둘다 실제

Table 1 Comparative measurement result of IMU and encoder

Distance	A (1,500 mm)		B (700 mm)		C (1,750 mm)		
	IMU	Encoder	IMU	Encoder	IMU	Encoder	
Count	1	1,488.91	1,461.73	694.11	674.25	1,762.3	1,708.4
	2	1,491.47	1,473.81	697.78	680.75	1,744.3	1,706.23
	3	1,485.86	1,469.56	695.91	685.09	1,754.46	1,713.82
	4	1,497.25	1,482.81	698.23	679.61	1,740.49	1,711.65
	5	1,493.61	1,479.56	687.19	685.09	1,765.01	1,707.31
D_{AVR}	1,491.42	1,473.49	694.64	680.958	1,753.31	1,709.48	
D_{Error}	±8.58	±26.506	±5.356	±19.04	±3.312	±40.51	



Fig. 9 Comparative measurement result of IMU and encoder

거리와 유사하게 측정되었다. 엔코더는 1 펄스당 0.135 mm의 분해능으로 산출하여 최대 C(1,750 mm) 기준으로 ±40 mm로 확인할 수 있었다. 한편, T265 IMU 센서는 센서가 움직일 때 가속도의 정보를 Translation으로 계산하여 정확한 위치를 추정하기

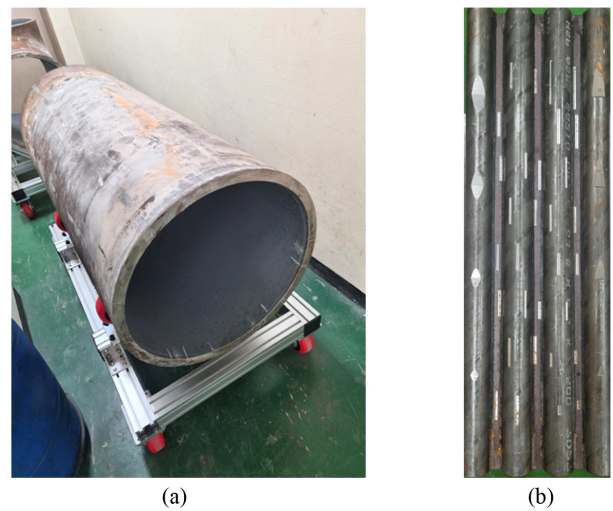


Fig. 10 Boiler tube and pipe specimen

때문에 실제 거리와 비교하여 오차가 ±10 mm로 확인할 수 있었다. 따라서, XY 평면 1,500 × 700 mm 공간에서 T265 IMU 센서를 활용하면 ±10 mm 오차로 스캐너의 위치를 추적할 수 있었다.

한편, 스캐너의 정확한 위치를 3차원 공간상에서 확인하기 위하여 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 발전소에서 증기 생산에 필수적으로 사용되고 있는 보일러 배관 및 튜브 실물 시험편을 활용하였다. Figs. 10(a)는 발전소 현장에서 사용되는 φ630 직경의 배관 시험편이며, 10(b)는 보일러와 동일한 재료에 인공 결함을 가공한 튜브 시험편을 나타낸다.

Fig. 11은 T265 IMU 센서를 활용한 보일러 배관 및 튜브 시험편 결과이다. IMU가 부착된 검사 스캐너를 통하여 측정된 결과를 2차원 Figs. 11(b) 및 3차원 11(c) 그래프로 표현하였다. Fig. 11의 상단은 보일러 배관 시험편 측정 결과로 배관의 직경이 630 mm이고, IMU 장착 높이 50 mm를 고려하여 약 732 mm로 배관을 검사한 스캐너의 위치 및 배관의 형태까지 묘사되었다. 한편, 하단의 보일러 튜브 시험편은 정방향 측정 후 다시 원점으로 돌아와 튜브를 이동하며 측정된 결과이다. 수동 측정에 의하여 미세한 오차가 발생함에도 불구하고 정확하게 튜브의

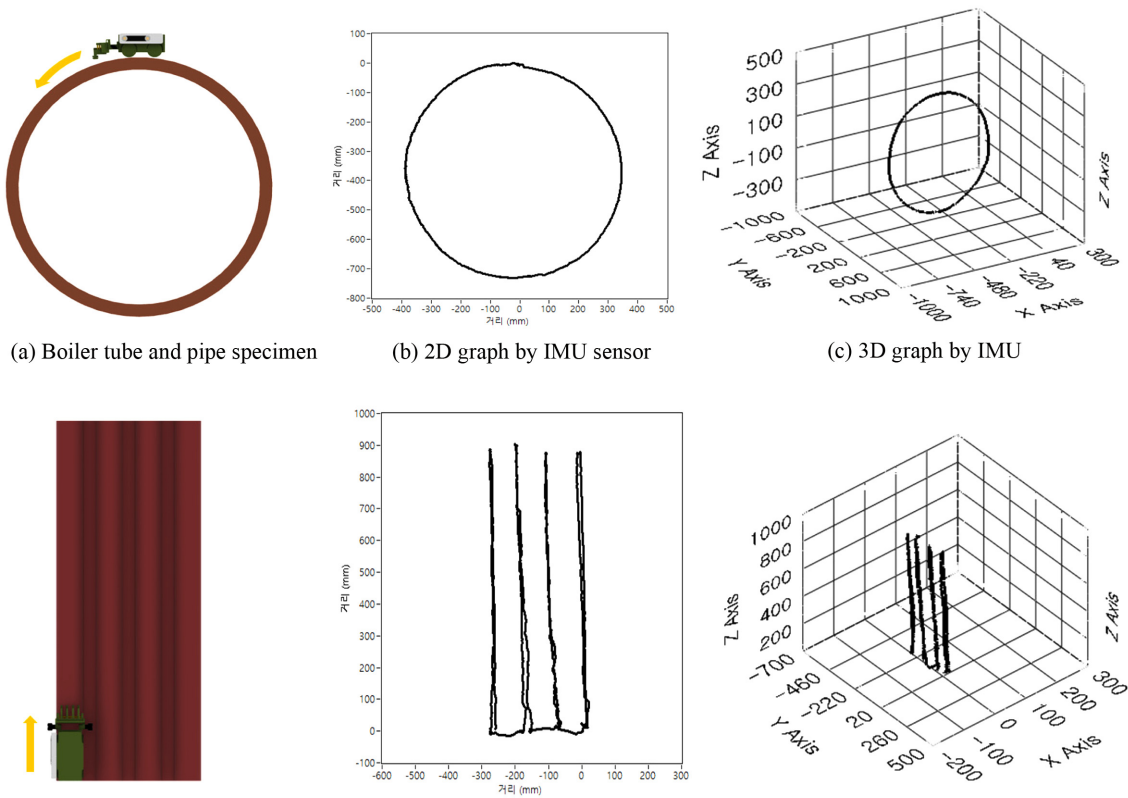


Fig. 11 Scanner tracking results of pipe and tube specimen using IMU

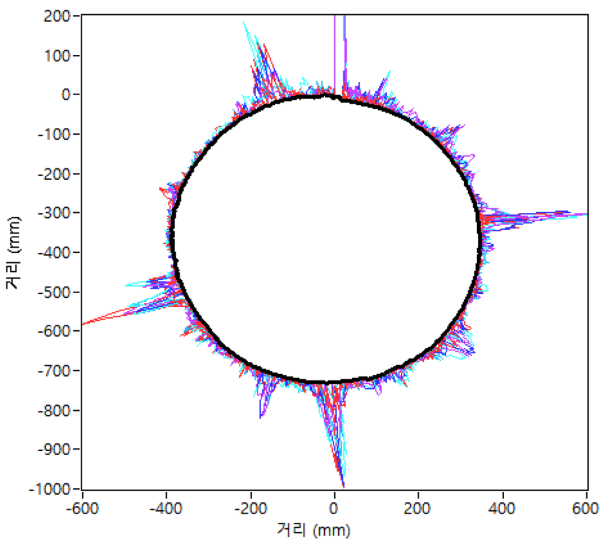


Fig. 12 Merge data measured by inspection scanner to location of boiler pipe specimen

위치를 추적할 수 있었다.

한편, Figs. 12는 검사용 스캐너로 취득한 자기장 데이터를 11의 배관 시험편 위치 정보에 매핑한 것이다. 검사용 스캐너는 자기장을 이용한 MMM (Metal Magnetic Memory) 스트레스 진단 기법으로 큰 외부 자기장이나 국부적으로 응력집중부가 존재할

때 발생하는 자기장의 변화를 감지할 수 있는 기술이다. Fig. 12와 같이 MMM 데이터 매핑 시 미분데이터의 평균값을 기본 노이즈로 하며, 이때 노이즈 값의 4배 이상의 자기장 변화가 검출되는 구간을 응력집중부로 판단하고 있다. 따라서, 스캐너의 위치에 대한 데이터 매핑을 통하여 75, 180, 250, 340° 부근의 자기장 변화에 대한 이상 부위를 직관적으로 파악할 수 있었으며, 응력 집중부로 판단된 부분은 초음파 검사결과를 통하여 상관성을 입증하였다.

5. 결론

IMU 기반의 센서는 가속도계, 각속도계, 지자기계 및 고도계를 이용하여 보행자 및 이동물체의 움직임을 인식하는 방식이다. 하지만 장시간 사용에 의한 노이즈 및 바이어스가 증가함에 따라 오차가 발생할 수 있다. 오차를 줄이기 위하여 가속도계와 각속계를 융합하여 예측해주는 보상 필터나 해당 위치에 최종 추정값을 통하여 연속적으로 보정해주는 칼만 필터를 적용하여 정확한 위치추적이 가능하다. 따라서, 본 논문에서는 GPS가 없는 발전소 및 실내환경에서 동작 가능한 T265 IMU 센서를 이용하여 스캐너의 위치를 추적할 수 있는 방법을 제안하였다. 상기 센서를 활용하여 실시간으로 위치를 모니터링 할 수 있는 프로그램을 개발하고, IMU를 장착한 스캐너의 정확한 위치를 검증하기 위하여 엔코더와 비교 실험을 진행하였다. XY 평면

1,500 × 700 mm 공간에서 T265 IMU 센서를 활용하여 실제 거리와 ±10 mm 오차로 스캐너 위치를 평가할 수 있었고, 보일러 배관 및 튜브 실물 시험편을 측정하여 3차원 공간상에서도 스캐너의 위치를 실시간으로 추적할 수 있었다. 또한, T265 IMU 센서를 부착한 스캐너의 위치 정보에 스트레스 측정 데이터를 매핑함으로써 자기장 변화에 대한 이상 부위를 직관적으로 파악할 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국전력공사 전력연구원 발전사 공동과제(No. R20GA04)의 지원을 받아서 작성되었음.

REFERENCES

- Mendoza-Silva, G. M., Richter, P., Torres-Sospedra, J., Lohan, E. S., and Huerta, J., "Long-Term Wifi Fingerprinting Dataset for Research on Robust Indoor Positioning," *Data*, Vol. 3, No. 1, p. 3, 2018.
- Lin, X. Y., Ho, T. W., Fang, C. C., Yen, Z. S., Yang, B. J., et al., "A Mobile Indoor Positioning System based on iBeacon Technology," *Proc. of the 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 4970-4973, 2015.
- Randell, C., Djallil, C., and Muller, H., "Personal Position Measurement Using Dead Reckoning," *Proc. of the 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, p. 166, 2003.
- Al-homayani, F. and Mahoor, M., "Improved Indoor Geomagnetic Field Fingerprinting for Smartwatch Localization Using Deep Learning," *Proc. of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp. 1-8, 2018.
- Roth, M., Hendeby, G., and Gustafsson, F., "EKF/UKF Maneuvering Target Tracking Using Coordinated Turn Models with Polar/Cartesian Velocity," *Proc. of the 17th International Conference on Information Fusion*, pp. 1-8, 2014.
- Rogers, R. M., "Weapon IMU Transfer Alignment Using Aircraft Position from Actual Flight Tests," *Proc. of the Position, Location and Navigation Symposium-PLANS'96*, pp. 328-335, 1996.
- Zhang, C., Guo, C., and Zhang, D., "Data Fusion based on Adaptive Interacting Multiple Model for GPS/INS Integrated Navigation System," *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 9, Paper No. 1682, 2018.
- Trumble, M., Gilbert, A., Malleon, C., Hilton, A., and Collomosse, J. P., "Total Capture: 3D Human Pose Estimation Fusing Video and Inertial Sensors," *BMVC*, Vol. 2, No. 5, pp. 1-13, 2017.
- Von Marcard, T., Rosenhahn, B., Black, M. J., and Pons-Moll, G., "Sparse Inertial Poser: Automatic 3D Human Pose Estimation from Sparse IMUs," *Computer Graphics Forum*, pp. 349-360, 2017.
- Fisher, C. J., "Using an Accelerometer for Inclination Sensing," http://fab.academany.org/2018/labs/fablabsmadridceu/students/victoria-peredorobinson/designs/datasheets/accelerometer_calculation.pdf (Accessed 19 OCTOBER 2021)
- Zhu, J., Wang, W., Huang, S., and Ding, W., "An Improved Calibration Technique for MEMS Accelerometer-Based Inclinometers," *Sensors*, Vol. 20, No. 2, Paper No. 452, 2020.
- Gui, P., Tang, L., and Mukhopadhyay, S., "MEMS Based IMU for Tilting Measurement: Comparison of Complementary and Kalman Filter Based Data Fusion," *Proc. of the 10th Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 2004-2009, 2015.
- Htun, Z. M. M., Latt, M. M., Nwe, C. M., and Mon, S. S. Y., "Performance Comparison of Experimental-Based Kalman Filter and Complementary Filter for IMU Sensor Fusion by Applying Quadrature Encoder," *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol. 8, No. 11, pp. 17-24, 2018.
- Durrant-Whyte, H., "Introduction to Estimation and the Kalman Filter," *Australian Centre for Field Robotics*, Vol. 28, No. 3, pp. 65-94, 2001.
- Wan, E. A. and Van Der Merwe, R., "The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation," *Proc. of the IEEE Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium*, pp. 153-158, 2000.
- Ding, W., Wang, J., Rizos, C., and Kinlyside, D., "Improving Adaptive Kalman Estimation in GPS/INS Integration," *The Journal of Navigation*, Vol. 60, No. 3, pp. 517-529, 2007.
- Matthies, L., Kanade, T., and Szeliski, R., "Kalman Filter-Based Algorithms for Estimating Depth from Image Sequences," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 3, No. 3, pp. 209-238, 1989.

**Ju-Hyeon Park**

Ph.D. candidate in the Department of Control and Instrumentation Engineering, Chosun University. His research interest is nondestructive testing.

E-mail: juhyeon_park@kepco.co.kr

**Jung-Seok Seo**

M.S candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungnam University. His research interest is nondestructive testing.

E-mail: jungseok.seo@kepco.co.kr

**Gye-Jo Jung**

Ph.D. candidate in the Department of Mechatronics Engineering, Chungnam University. His research interest is nondestructive testing.

E-mail: keprica.jung@kepco.co.kr