

삼각 측위 기법을 이용한 변위 측정 알고리즘 및 모니터링 시스템 구현

이 경 석*, 서 정 빈*, 김 석 찬^o

Implementation of Seismic Motion Monitoring System and Displacement Estimation Algorithm Using Triangulation Method

Kyeongseok Lee*, Jeongbin Seo*, Suk Chan Kim^o

요 약

국내외적으로 지진이 빈번하게 발생함에 따라 지진 안전성 강화에 대한 관심이 증대되면서 다양한 기계, 전기 장치에 대한 지진 피해를 저감할 수 있는 면진장치가 개발되고 있다. 하지만 면진 대상체가 지진시 한계이상의 변위로 전도되는 문제가 발생하여 장비 손상의 1차 피해뿐만 아니라 주요 데이터 손실 등 2차 피해가 발생하기도 한다. 따라서 면진장치 상부 탑재물의 기능 연속성 확보를 위해 면진장치의 운동 이력을 실시간으로 측정하고 관리할 수 있는 방안 마련이 요구되고 있다. 대형 시설물에 적용되는 고가의 센서와 서버를 면진장치에 적용하는 것은 비합리한 실정이며, 이를 직접적으로 면진장치의 협소한 공간과 회전하는 특성에서 변위를 감지하기에는 어려운 문제점이 있다. 본 논문은 제한된 공간과 조건의 면진장치 내부에서 발생하는 변위를 측정하는 삼각 측위 기법을 이용한 알고리즘을 제안하고 실시간으로 이를 관리하는 모니터링 시스템을 구현하였으며, 이에 대한 측위 알고리즘의 신뢰성과 모니터링 시스템의 유효함을 검증하기 위하여 지진 모사 실험을 실시하였다.

Key Words : Seismic Isolation, Displacement, Rotary encoder, Monitoring system, Wireless LAN

ABSTRACT

The seismic isolators are being developed to reduce earthquake damage under various machinery and electrical devices according to frequent occurrence of earthquakes on domestically and abroad. However, the capsizing accident of devices were reported such as to occur the secondary damage due to major data loss as well as primary damage to devices because of displacement over limit during earthquake. In order to maintain functional continuity of devices, the maintenance method and time history of the seismic isolator were required in real time. An application of expensive sensors and servers at smaller devices were unreasonable and the measurement of time history was difficult because of the confined space and characteristic of seismic isolator. In this study, to propose the implementation of seismic motion monitoring system and displacement of seismic isolator, the estimation algorithm was developed using triangulation method. In addition, to verify the reliability of the positional algorithm and the effectiveness of monitoring system, it was compared with seismic test.

※ 이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

• First Author : Pusan National University Department of Electronics Engineering, lks.es@pusan.ac.kr, 학생회원

* Pusan National University Department of Electronics Engineering, sjb9612@pusan.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Pusan National University Department of Electronics Engineering, sckim@pusan.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202105-106-D-RN, Received April 27, 2021; Revised July 1, 2021; Accepted July 24, 2021

I. 서 론

전산실 및 데이터 센터 등의 전기통신설비는 지진 동 저감 장치인 면진테이블 상부에 설치되고 있다. 2011년 일어난 동일본 대지진의 피해 사례로서 지진 시 면진장치가 구현할 수 있는 한계 이상의 변위가 발생하여 상부에 탑재된 대상체가 전도되는 피해가 발생하기도 한다¹⁾. 기존의 설치되는 면진장치는 경제성 등 문제로 개별 시설물의 동적 거동을 고려한 제품 설계가 불가능하며, 설치 등 오류에 따른 면진 기능 저하 발생 가능성이 있다. 따라서 면진 대상체의 기능 연속성 확보를 위해 지진시 면진장치의 위치 변화를 실시간으로 측정하여 관리할 수 있는 방안 마련이 대두되었으며, 지진 피해가 발생한 경우 발생 지진력의 크기 및 면진장치의 정상적 작동 여부 등의 확인도 요구가 증대되고 있다²⁾.

소형 면진 대상체의 경우 대형 시설물에 쓰이는 고가의 센서와 중앙 집중형 서버에서 모니터링하는 것은 경제적으로 불합리한 실정이며, 장치의 높이가 70 ~ 100 mm로 제작되고 내부 면진 유닛과 통신 및 전력 케이블의 설치 등 때문에 이를 직접적으로 감지할 수 없어 대상체의 기능 연속성 확보 및 신속한 대처가 어려운 문제점이 있다.

지진과 같은 재난 시 구조물에 입은 피해를 파악하고 유지관리를 위해 운동 이력을 측정할 다양한 방안이 제시 되어있다. 그중 경제적인 측정 방법은 레이저의 반사각을 이용한 광학 거리 센서, 측정 대상에 케이블로 연결하여 변위를 전압 특성으로 변환하는 센서(LVDT) 등이 있다. 하지만 지진동 저감 장치에는 이와 같은 측정 장치가 설치되기엔 공간이 협소한 구조이고 블베어링 타입의 면진장치는 각 베어링이 독립적으로 거동하여 상부 면진 대상체가 회전 할 수 있다. 그리고 상부 면진 대상체는 지진 거동 후 원위치 복구를 위해 곡면으로 되어있어 바깥 방향으로 이동할수록 수직 방향의 변위가 발생한다. 공간적 문제뿐만 아니라 전기통신설비와 같은 시설에는 지진 시 화재 발생으로 인한 연기로 광학적 측정 장치를 사용하는 것은 안정적인 측정을 기대하기 어려운 실정이다.

전산실 및 데이터 센터의 서버 장치는 한 공간에 다수로 설치가 되어있는 경우가 대부분이다. 지진시 지진동 저감 장치는 동일 공간에 설치되어 있으나 건 축물의 구조 특성에 따라 거동이 다르게 발생할 수 있다. 따라서 장치는 다수의 변위 측정 장비를 병렬로 설치 및 결과를 수집하여 피해 분석을 할 수 있어야 한다. 그리고 수집 장치의 통신을 유선으로 할 경우

지진으로 인한 단절의 위험이 있으므로 무선으로 구현할 필요가 있다³⁾.

본 논문은 변위를 직접 측정할 수 없는 공간에서 각도 센서를 이용하여 변위를 측정하는 방법을 제안 하였다. 변위 측정은 각도 전달체에 의해 물리적으로 전달된 각을 측정하여 이를 변위로 환산하는 알고리즘을 구현하였다. 각도 센서와 물리적 전달체를 이용한 방법은 센서의 설치 방법 및 센서의 분해능에 따라 변위 측정 성능에 영향을 준다. 이를 수식으로 분석하고 면진장치에 적용할 시 분해능 성능을 평가하였다. 측정된 변위는 지진 발생을 감지하여 자동으로 운동 이력을 저장하며, 면진장치 및 면진 대상체의 피해를 분석하고 유지관리를 위한 모니터링 시스템을 구현하였다. 제안된 방법을 적용하여 알고리즘의 정확성과 모니터링 시스템의 유효성을 증명하기 위해 인공 지진과 진동 실험을 통하여 지진동에 의한 안정적인 성능을 평가하고자 한다.

II. 변위 알고리즘 및 시스템 구현

2.1 변위 측정 알고리즘

본 연구에서는 지진동에 의한 면진장치의 상판과 하판 사이 발생하는 수평운동 이력을 측정하는 방법을 제시한다. 개발한 변위 측정 장치는 면진장치의 한정적인 공간에서 효율적이고 비교적 저렴한 센서로 구성되어 소형 면진체에 적용되기에 합리적인 방법을 연구하였다. 이 장에서는 동작하는 알고리즘의 유효성을 검증하고, 개발된 센서로 측정한 운동 이력과 영상 표적 처리를 통한 면진장치의 운동 이력을 비교·분석하여 시스템의 신뢰성 검증을 실시하였다⁴⁾.

면진장치 상판에 설치된 각도 센서는 측정 대상체인 하판의 움직임을 각도 전달체를 사용해 측정한다. 각도 센서와 각도 전달체는 그림 1과 같이 구성하

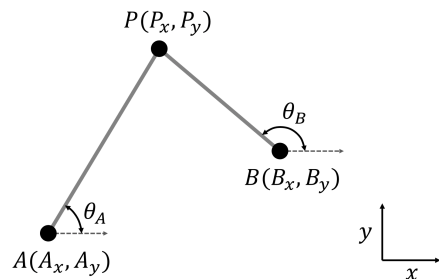


그림 1. 제안하는 삼각 측위 기법에 의한 변위 측정 원리
Fig. 1. Foundations for measuring displacement using proposed triangulation method

여 2차원 평면상의 측정 대상의 변위를 측정한다. 측정 대상의 움직임을 센서에 전달하기 위한 각도 전달체는 측정 대상에 관통되어 선형 움직임에 걸림이 없고 회전이 자유로워야 한다. 각도 전달체의 가동 방향은 면진체가 이동하는 평면 방향과 동일하여 면진장치와 같은 좁은 상·하판 사이에 설치가 용이하다. 각도 전달체는 면진장치의 운동으로 인해 휘어지지 않고 중력에 의한 처짐이 없을 정도의 충분한 강도와 무게로 선정하여야 한다.

변위 측정 알고리즘의 기본 원리는 삼각형 결정조건 성질에서 고안되었다. 삼각형에서 두 꼭짓점의 위치가 고정되고 양 각을 알면 남은 꼭짓점의 위치는 정해진다. 그림 1은 이 점을 이용하여 점 A, B에 각도 센서를 위치하였을 때 측정 대상의 위치 P를 정의하기 위한 원리를 설명하는 평면 좌표 그림이다. 점 A, B 및 점 P 사이를 잇는 선분과 X축 사이의 각도를 θ_A, θ_B 일 때 점 P와 점 A, B의 위치는 식 (1)과 식 (2)로 정리된다.

$$P_y - A_y = (P_x - A_x) \cdot \tan\theta_A \quad (1)$$

$$P_y - B_y = (P_x - B_x) \cdot \tan\theta_B \quad (2)$$

이때 두 식을 연립하면 식 (3)과 식 (4)로 산출되어 측정 위치 P_x 와 P_y 가 정의된다.

$$P_x = \frac{A_x \cdot \tan\theta_A - B_x \cdot \tan\theta_B - A_y + B_y}{\tan\theta_A - \tan\theta_B} \quad (3)$$

$$P_y = (P_x - A_x) \cdot \tan\theta_A + A_y \quad (4)$$

2.2 변위 측정 분해능 분석

본 연구에서 개발한 변위 측정 알고리즘의 식 (3)과 식 (4)에서 P_x, P_y 는 각도 센서 위치와 각도 센서의 각도 측정으로 변위가 도출된다. 그로 인해 알고리즘을 통해 계산된 변위의 분해능은 각도 센서의 분해능과 각도 측정 장치 간의 위치로 결정된다. 그림 2는 변위가 발생하였을 때 발생하는 각도 전달체 및 각도 센서의 변화를 모식한 그림이다. 여기서 측정 대상이 최소 측정 단위의 각도로 이동했을 시 변위 \vec{m} 는 식 (3)과 식 (4)에 대입하고 식을 정리하면 식 (5)과 식 (6)이 도출된다. 계산을 용이하게 하기 위해 Sensor A의 위치는 원점으로 하고 같은 수평선상에 Sensor B를 위치하였다.

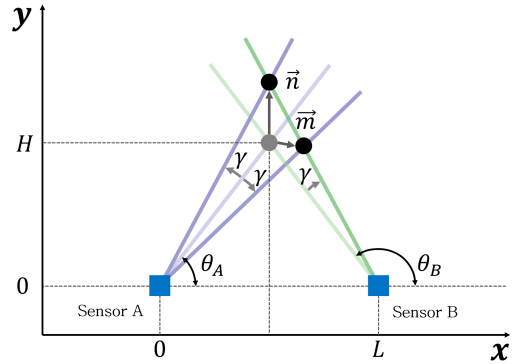


그림 2. 삼각 측위 기법 알고리즘의 단위 변위
Fig. 2. Minimum displacement unit of implemented algorithm

$$m_x = L \cdot \frac{\tan\gamma \cdot (1 + \tan^2\theta_A)}{\tan\theta_A \cdot (1 + \tan^2\gamma)} \quad (5)$$

$$m_y = L \frac{\tan\theta_A + \tan\gamma}{1 - \tan\theta_A \cdot \tan\gamma} + L \cdot \tan\theta_A \quad (6)$$

면진장치 운동 이력을 분석하기 위한 변위 정밀도는 1mm 이하의 성능이면 만족한다. 실험에서 적용될 각도 센서의 분해능은 0.05° , 센서 간 거리는 410mm, 측정 대상 간의 수직 거리는 340mm로 설정하였다. 그림 3은 각도 센서의 최소 측정 단위마다 측정되는 변위 지점을 2×2 mm 격자에 나타내었고 원점에서 점 간의 거리를 표시하였다. 여기서 변위 분해능은 측정되는 위치에 따라 다르게 나타난다. 각도 센서와 가까운 구역에서는 격자 간의 간격이 줄어들고 멀

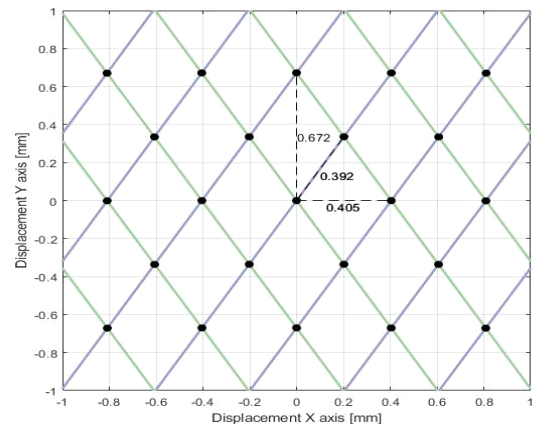


그림 3. 실험 조건에서 원점의 변위 분해능
Fig. 3. Resolution of displacement at origin under experimental conditions

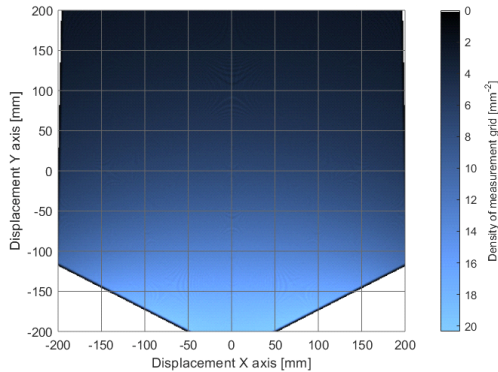


그림 4. 실험 조건에서 변위 측정 알고리즘의 분해능 밀도 색도
 Fig. 4. Resolution density color map of displacement estimation algorithm under experimental conditions

어질수록 커지는 경향이 있다.

식 (5)과 식(6)에서 변위는 위치조건에 의한 선형 관계에 있고 각에 대해서는 비선형 관계에 있음을 알았다. 이를 단위 면적당 변위 지점의 수를 그림 4와 같이 컬러맵으로 표현하였다. 센서와 가까울수록 밀도가 증가하며 이는 측정 변위가 센서 노이즈에 민감하게 반응할 것을 알 수 있다. 반대로 센서와 멀어지면 측정 분해능이 떨어짐을 의미한다. 먼진장치에서 제안하는 방법의 측위 알고리즘은 물리적 위치를 조정함으로써 측정에 요구되는 적절한 성능을 타협해야 하는 필요성이 있다. 이러한 성능 하락 구간을 보완하기 위해 각도 센서를 다각에 추가하여 변위를 측정하는 알고리즘을 향후 연구할 수 있는 방안이 있다.

2.3 지진동 모니터링 시스템

본 장은 모니터링 시스템의 구현을 위한 기술과 프로그램의 블록도를 제안한다. 모니터링 시스템은 지진시 발생한 운동 이력을 분석하여 2차 피해를 대비하기 위해 지진을 감지하고 자동으로 운동이력을 저장하는 기능을 포함한다. 그리고 지진을 감지하기 위해 상시로 산출되는 변위 계산과 통신 처리 연산 비용으로 인한 센서 측정 샘플링의 지연에도 견고한 알고리즘으로 구현하였다. 먼진장치의 특성상 상하판은 자유운동하기 때문에 데이터 케이블을 통해 통신하는 것은 구조적으로 어려운 문제가 있으므로 무선으로 통신하였다. 요구되는 전송량과 속도를 무선랜(Wireless Local Area Network; WLAN) IEEE 802.11n 규격을 이용하여 만족시켰다. 다수의 데이터를 병렬로 수집하고, Full-Duplex와 Real Time-Networking을 보장하기 위해 Web socket 프로토콜로 통신하였다^{5,6)}.

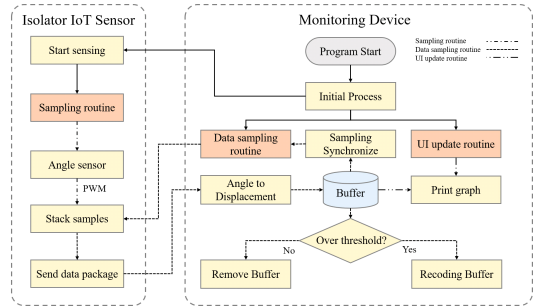


그림 5. 구현된 모니터링 시스템 블록도
 Fig. 5. Block diagram of the implemented monitoring system

그림 5는 먼진장치에 센서와 각도 전달체를 이용한 삼각 측위 기법과 모니터링 시스템과의 연계를 설명하는 블록도이다. 각도 센서에서 측정된 각도를 시간 이력으로 처리되기 위해 주기적으로 통신을 하는 방법은 통신 지연과 모니터링 장치에서 처리되는 변위 변환 및 UI 구성 등의 이유로 신뢰 높은 주기율을 가지기 어렵다. 시스템이 시작되면 모니터링 장치(Monitoring device)는 초기 설정과 데이터 샘플링 루틴(Data sampling routine) 및 사용자 인터페이스 업데이트 루틴(UI update routine)과 먼진장치 센서(Isolator IoT Sensor)에서 샘플링 루틴(Sampling routine)을 각각 생성되어 표기된 점선의 순서도를 반복 동작하도록 프로그램을 구성하였다. 먼진장치 센서에서 측정되는 데이터는 주기적으로 동작되는 샘플링 루틴으로 시간 색인과 함께 Sample Package에 저장하고 모니터링 장치의 데이터 샘플링 루틴의 요청으로 전송된다. 샘플링 루틴과 데이터 샘플링 루틴은 일정한 Sample Package 크기를 유지하기 위해 매 순간 버퍼에 저장되는 데이터 크기를 이전 데이터의 크기와 비교하여 동기화한다. 데이터 패키지에 시간 색인이 지정되기 때문에 전송받은 시각과 무관하게 시간 이력으로 구성이 가능하다. 데이터 패키지의 크기는 클수록 전송 효율이 높아지지만, 송신 지연 시간이 측정 주기율을 넘게 되면 주기적인 측정에 문제가 발생한다. 모니터링 장치는 상시 측정되는 변위를 입력된 크기의 Buffer에 저장하고 지진을 감지하면 하드 드라이브 기록을 시작한다. 지진감지 방법은 지정한 문턱값을 초과하면 발동되도록 하였고, 정지 신호는 3~5초간 노이즈 레벨이 도달할 수 없는 크기만큼의 지정된 값을 초과하지 않으면 저장 및 초기화를 하도록 설정하였다. 사용자 인터페이스 루틴은 데이터 수집과 독립으로 동작되어 Buffer에 저장되어 있는 운동 이력을 화면에 실시간으로 구성한다.

III. 실험

본 연구에서 개발한 변위 측정 알고리즘의 신뢰성과 기록 및 모니터링 시스템의 유효함을 실험으로 증명하였다. 삼각 측위 기법 알고리즘을 통한 변위 측정의 신뢰성을 판단하기 위해 기준 변위와 비교하였다. 기준변위는 지진 진동 실험에서 실험체의 운동 이력을 측정하는 일반적인 방법 중 선형 가변 차동 변환기 (Linear Variable Differential Transducer; LVDT)를 이용하는 것이 있다. LVDT는 측정 대상에 센서로부터 와이어 또는 막대 형태의 자를 연결하여 대상의 변위를 측정하는 센서이다. 높은 정밀도와 낮은 히스테리시스 특성으로 다양한 분야에 사용되며 본 실험에서 비교 측정 결과로 활용하도록 적용하였다. 실험에서 면진장치 상판과 하판의 상대 변위를 측정하기 위해 각 독립의 절대 변위를 측정하여야 한다. 하지만 실험에서 하판의 절대변위를 얻어 내는 것에 실패하여 영상기반 변위 추정 기법을 참고하여 비교 변위를 얻었다. 그림 6은 삼각 측위 기법 알고리즘을 이용한 모니터링 시스템을 구현한 모식도이다. 면진장치 하판 중앙을 측정 대상으로 하여 상판에 설치된 각도 센서와 데이터 수집 유닛이 설치되고 모니터링 장치에서 수집된 데이터를 변위로 변환한다. 모니터링 시스템은 지진시 저장 및 통보 등을 수행한다. 실험은 구현한 시스템의 내구성과 기능의 정상작동을 확인한다.

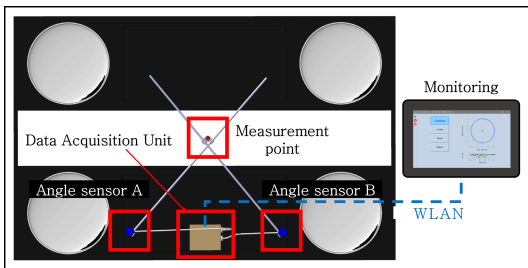


그림 6. 각도 센서를 이용한 변위 측정 알고리즘 및 모니터링 시스템
 Fig. 6. Displacement estimation algorithm using angle sensors and monitoring system

3.1 진동대에서의 실험 환경 구축

본 실험에서 진동에 의한 동적 거동 측정 자료는 진동대 실험을 하여 얻었다. 실험은 그림 7과 같이 한국기계연구원의 6 자유도 다축 내진 시험기 상부에 면진장치와 본 논문에서 제안하는 삼각 측위 알고리즘이 적용된 모니터링 장치를 설치하고 서버랙을 탑재물로 하여 실제와 유사한 환경을 구축하여 실험하

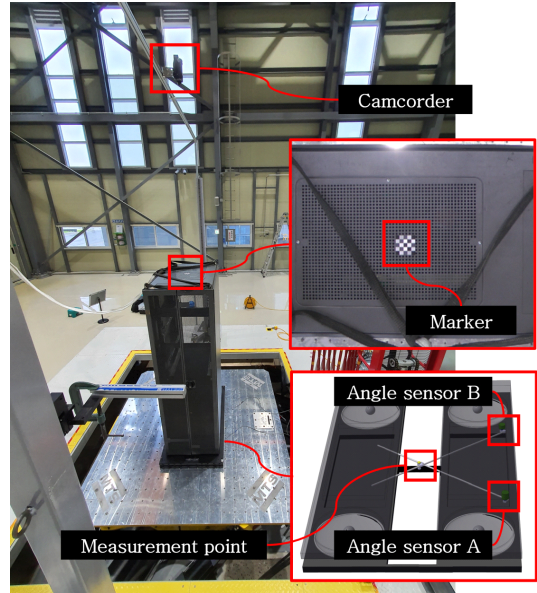


그림 7. 구현된 운동 이력 측정 장치 및 모니터링 시스템의 실험 설치 모습
 Fig. 7. Installation for test on implemented instruments and monitoring systems

였다. 지진모사 실험 시 유발되는 진동은 면진장치에 전달되고 하판과 상판에 변위를 발생하여 이를 제한된 삼각 측위 알고리즘으로 구현된 모니터링 장치를 통해 측정하였다. 측정 위치는 면진장치 하판의 지지대 중앙지점(Measurement point)을 측정하였다. 삼각 측위 알고리즘을 구성하기 위한 두 각도 센서(Angle sensor A, B)는 측정지점으로부터 수직거리 340mm, 센서 간 거리 410mm에 위치하여 운동 이력을 측정하였다. 측정된 운동 이력의 정확성을 판단하기 위한 참고 데이터는 탑재물 상부에 부착된 마커를 부착하여 캠코더 동영상 촬영을 통해 영상 기반 변위 추적 알고리즘으로 측정하여 비교 검증하였다. 진동대는 ICC-ES, AC156에서 정의하는 응답스펙트럼 (Required Response Spectrum; RRS)을 만족하는 인공 지진파와 고베지진을 좌우(X), 전후(Y), 상하(Z) 방향으로 동시 진동하여 면진장치 및 하중에 지진을 모사하였다^{7,8)}. 실험 방법은 준비된 지진파를 입력으로 면진장치 및 하중의 운동 변화를 유발하여 구현된 센서 시스템의 동작 확인하고 측정된 변위를 실제 거동과 비교하여 삼각 측위 기법 알고리즘의 신뢰성을 분석한다.

삼각 측위 기법 알고리즘을 구현하기 위해서는 각도 센서와 각도 전달체가 필요하다. 각도 센서는 절대형 회전각 엔코더 센서(Absolute Rotary Encoder

Sensor)를 사용하였다. 자기 방식으로 동작하기 때문에 전원이 중단되었다 복구되어도 절대적 위치를 제공할 수 있다⁹⁾. 측정 샘플링 속도는 113 Hz 이고 분해능은 0.05° 이다. 각도 전달체는 중력에 의한 처짐이 없고 관성에 의한 휘어짐이 적은 금속 재질이며 면진장치 26 mm 간격의 상·하판 사이에 설치가 가능한 6 mm 알루미늄 환봉으로 하였다. 엔코더에서 측정된 각도는 펄스(PWM)로 송출되어 마이크로컨트롤러(MCU)로 로깅하였다. PWM의 카운트 주기는 1.22 usec이므로 0.89 usec 속도로 타이머 캡처가 가능한 마이크로컨트롤러 STM32-F103RB를 사용하였다. 무선 통신은 ESP32s 모듈을 사용하여 Web Socket 인터페이스 통신하였다. 모니터링 시스템은 Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz가 탑재된 싱글보드 컴퓨터에 설치하였다. 측정 속도를 40Hz 이상으로 하였을 때 병목현상이 발생하여 실험은 38Hz로 측정하였다.

실험 결과를 비교하기 위한 기준 데이터는 영상기반 변위 추적 기법으로 얻었다. 그림 8은 Block matching을 이용한 Optical Flow의 원리이다. Block matching은 이미지 프레임을 일정한 크기로 나누고 현재 프레임(b)에서 가장 유사한 블록의 위치(x_p)를 이전 프레임(a)에서 찾아 그 블록으로 현재 블록의 위치(x_c)를 찾아내는 방법이다. 영상 타겟의 이동 속도가 적을 경우 탐색 영역(Search area)을 정하여 유사 블록을 찾아내는 연산량을 줄여준다. 블록의 위치의 단위는 이미지의 Pixel임으로 Numerical error가 발생한다. 이를 최소화하기 위해 마커의 다수 지점을 추적하여 운동 이력을 평균한 것을 기준 변위 기점으로 하였다. 측정된 값은 이미지 화소 단위로 마커의 실측 길이를 비율로 환산하였다. 면진장치에서 발생한 상판과 하판 사이의 상대 변위는 각각의 절대 변위의 차로 계산된다. 상판의 절대 변위는 마커를 통해 얻었고 하

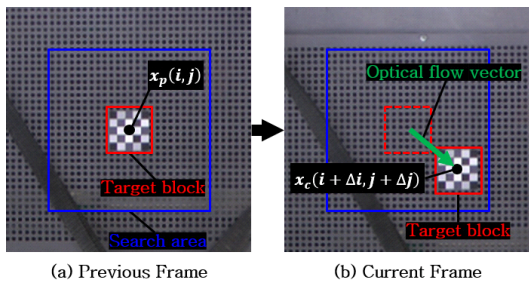


그림 8. 영상 기반 변위 추적 알고리즘
Fig. 8. Image-Processing displacement tracking algorithm

판의 절대 변위는 진동 테이블의 고정 홀을 Target으로 하여 변위를 추적하였다.

3.2 진동대 실험 측정 결과

실험에서 구현한 모니터링 시스템은 진동대 실험으로 지진 발생을 감지하고 운동 이력을 자동으로 저장하는 것을 확인하였다. 그림 9, 10은 기록지진(Kobe, 3축)으로 진동 실험한 결과를 삼각 측위 기법 알고리즘(Device-Measurement)과 영상기반 변위 추출(Image-Processing)로 측정된 결과를 각 X 축, Y 축으로 나누어 나타내었다. 모니터링 시스템에서 측정된 운동 이력과 영상기반 변위 추적은 각기 다른 장치에서 측정되어 동기화되지 않아 시간 축이 다르다. 이를 비교하기 위해 교차 상판을 하여 유사도가 높은 지점의 색인을 시간 축에 반영하였다.

두 방법으로 측정된 결과의 유사성을 평가하기 위해서 시계열 데이터의 시간축이 일치하여야 한다. AC156 100% 인공지진과 실험에서 영상기반 변위 추

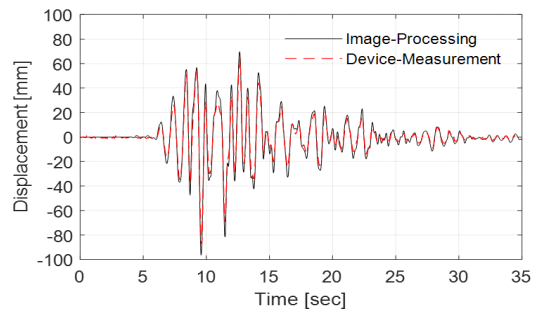


그림 9. 고베지진 실험 시 영상측정 및 제안방법에 의한 변위측정 결과 비교 (X-방향)
Fig. 9. Comparison of the displacement measurement results between digital image-processing and proposed methods under Kobe earthquake test(X-axis)

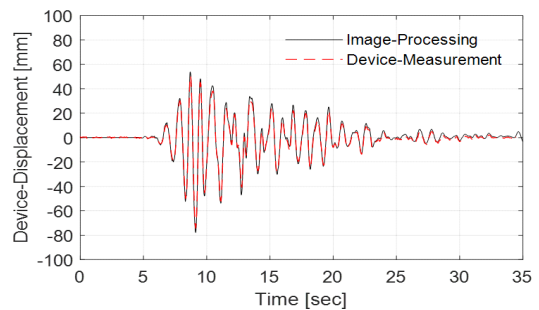


그림 10. 고베지진 실험 시 영상측정 및 제안방법에 의한 변위측정 결과 비교 (Y-방향)
Fig. 10. Comparison of the displacement measurement results between digital image-processing and proposed methods under Kobe earthquake test(Y-axis)

적 결과에서 5 mm 이상의 첫 번째 최대치는 11.32초에 발생하였고 마지막 최대치는 37.423초에 발생하였다. 구현한 모니터링 시스템에 의한 첫 번째 최대치는 11.323초에 발생하였고 마지막 최대치는 37.45초에 발생하였다. 이때 영상기반 변위 추출에 의한 시간차를 개발 알고리즘의 시간차로 나눈 결과 99.98% 일치하였다. 그리고 두 운동 이력을 FFT(Fast Fourier Transform) 하였을 때, 주요 주파수는 영상기반 변위 추적에서 1.152 H z이고 모니터링 시스템의 경우 1.155 Hz로 99.74% 일치하였다. 이 결과는 모니터링 장치의 시계열 변위 측정은 두 측정 결과를 시계열 분석하는 것에 문제가 없고 모니터링 장치의 시계열 데이터를 저장하는 기능에 문제가 없는 것으로 분석된다.

본 논문에서 개발한 알고리즘의 신뢰성을 파악하고자 유사도 분석하였다. 유사도를 분석하는 방법에는 운동 이력의 최대치(Peak)의 크기를 비교하고, 교차상관(Cross Correlation)을 통해 유사도를 분석하였다. 그림 11은 고베지진 실험에서 삼각 측위 기법 알고리즘과 영상기반 변위 추적을 통해 측정된 X축 운동 이력의 5 mm 이상의 최대치를 운동 이력곡선 위에 표시하였다. 최대치는 56회 발생하였고 오차의 크기는 일관성이 없었다. 평균 제곱근 오차(Root mean Square Error; RMSE)를 한 결과 6.50 mm 이었다. 하지만 이를 영상기반 추적된 변위에 삼각 측위 기법으로 측정된 변위를 나눈 결과 그 비율들이 일정한 값이 되었다. 이 비율의 평균을 측정된 변위에 곱하여 평균 제곱근 오차를 한 결과 4.02 mm가 되었다. 곱하기 전 평균 제곱근 오차 보다 38.18% 감소한 것을 확인하였다. 같은 방법으로 AC156 100% 2축 인공 지진파의 실험 결과로는 평균제곱근오차가 7.07 mm이고 최대치 비율을 곱할 경우 2.69 mm로 61.99% 감소하여 더

높은 수치로 줄어든 것을 확인하였다.

영상기반 변위 추적은 면진장치 상부에서 아래로 촬영한 영상으로 측정하여 상하 진동에 의한 변위는 측정할 수 없다. 그로 인해 실측 길이 변환하는 과정에서 카메라와 마커 사이 거리를 반영할 수 없다. 이러한 결과로 고베지진 3축 실험 시 영상기반 변위 추적적으로 운동 이력 측정에서 오차가 더 증가한 것으로 분석된다. 같은 방법으로 고베지진 3축 실험의 Y축 운동 이력에서 최대치 분석 결과 평균 제곱근 오차가 2.86 mm이고 평균비율로 교정한 후 1.67 mm로 41.49% 감소한 것을 확인되었다. 그리고 AC156 100% 2축 인공지진 실험의 경우 2.63 mm이고 교정 후 1.77 mm로 32.69% 감소하였다. Y 축 측정 결과는 X축 보다 오차가 줄어들었다. 평균 비율의 곱으로 교정을 취하여도 줄어드는 오차의 크기 또한 작았다. 각 축의 결과가 다른 이유는 최대치의 평균 비율은 삼각 측위 기법 알고리즘에 입력되는 센서 간격, 면진장치 체원 등의 초기 정보에 의한 오차로 분석된다. 식 7은 두 측정 결과의 유사성을 측정하기 위한 교차상관 함수의 정의이다. 유사성을 객관적으로 판별하기 위해 식 8과 같이 자기상관을 1로 하여 정규화 한다. 그림 12는 이 식을 적용하여 고베지진 실험으로 측정된 두 결과를 X축, Y축 각각 적용한 결과이다. 이때 교차상관 함수에서 지연시간이 0초인 지점의 유사도는 X 축 99.07%, Y 축 99.45%로 산출되었다. 같은 방법으로 AC156 100% 인공지진에서는 99.45%, 99.61%로 최대치 분석과 유사한 패턴으로 오차의 감소 경향이 있음을 파악하였다.

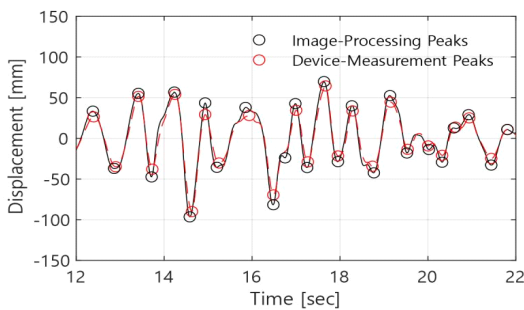


그림 11. 고베지진 실험 시 영상추정 및 제안방법에 의한 변위측정 결과 비교 상세 (X-방향)
Fig. 11. Detailed comparison of the displacement measurement results between digital image-processing and proposed methods under Kobe earthquake test (X-axis)

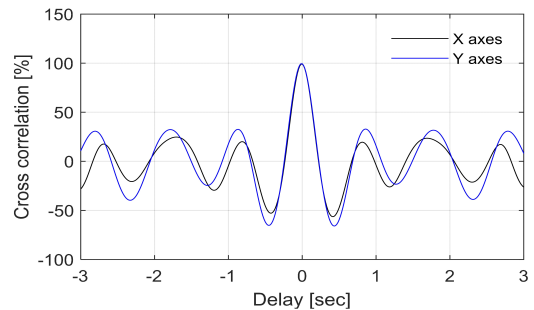


그림 12. 고베지진 실험 시 영상추정 및 제안방법에 의한 변위측정 결과의 교차상관도 비교
Fig. 12. Cross-correlation comparison of the displacement measurement results between digital image-processing and proposed methods under Kobe earthquake test

$$R_{f_{g,normalized}}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{R_{ff}(0) \cdot R_{gg}(0)}} R_{fg}(\tau) \quad (8)$$

모니터링 시스템은 언제 발생할지 모르는 지진을 대비하기 위한 시스템으로 상시 전원이 연결되어 작동이 되어야 한다. 시스템의 안정성을 평가하기 위해 구현한 장치를 1개월 동안 상시 가동하였다. 실험을 하는 동안 기능의 연속성을 파악하기 위해 2~3일의 주기로 면진장치를 직접 변위를 발생하여 지진감지 및 운동 이력 저장하는 기능에 문제가 없음을 확인하였다. 또한 지진 모사 실험에서 구현된 변위 측정 장비와 모니터링 시스템에 결함이 없음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문은 지진시 기존 고가의 센서 및 중앙 집중형 서버를 이용한 구조물 변위 측정 방식을 개선하고자 면진장치에서 발생하는 변위를 저가의 센서로 합리적으로 측정하는 알고리즘과 운동 이력을 저장하는 시스템을 구현하였다. 운동 이력 결과는 진동대 실험을 통해 신뢰성을 검증하였다. 비록 검증을 위한 비교 대상이 영상기반 변위 추출로 하여 불확실성이 있었다. 하지만 실험 결과에서 분석한 신호의 유사성은 99.07%로 신뢰적인 결과를 검증하였다. 시스템의 안정성은 장치를 실행하여 지진이 발생하는 방식과 유사하게 방치한 후 변위를 발생시켜 문제가 없음을 확인하였다.

개발한 기학적 특성을 이용한 삼각 측위 알고리즘은 직접측정이 어려운 좁은 구조에 적합하며, 각도 전달체의 이동 범위에 장애물이 있을 시 제한된다. 삼각 측위 기법 알고리즘의 분해능 성능은 장치 간의 거리에 연관되어 거리가 먼 구간에서 분해능 성능이 떨어진다. 이를 보완하는 방법으로 각도 측정 장치를 다수로 하여 성능 하락 구간을 줄이는 향후 연구 방안을 마련할 수 있다.

References

[1] S. Takagi Wright, *Report of investigation for steel structure by Tohoku earthquake*, Japan Society of Civil Engineering, 2012.

[2] J. H. Sim, "Trend of seismic countermeasure criteria and seismic testing technology in telecommunication facilities," *J. KICS*, vol. 36, no. 3, pp. 70-78, Feb. 2019.

[3] H. J. Chang, I. J. Shim, B. S. Kim, Y. B. Kong, and G. T. Park, "Development of an architecture monitoring system using wireless sensor network," *J. Inst. Control, Robotics and Syst.*, vol. 13, no. 6, pp. 568-573, 2007.

[4] S. W. Kim and N. S. Kim, "Verification of multi-point displacement response measurement algorithm using image processing technique," *J. Korean Soc. Civil Eng.*, vol. 30, no. 3A, pp. 297-307, 2010.

[5] V. Pimentel and B. G. Nickerson, "Communicating and displaying real-time date with WebSocket," *IEEE Internet Comput.*, vol. 16, no. 4, pp. 45-53, Jul.-Aug. 2012.

[6] K. Miyashita, T. Takahashi, and M. Yamanaka, "Features of a magnetic rotary encoder," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 23, no. 5, pp. 2182-2184, Sep. 1987.

[7] ICC-ES, "AC156-2010 Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake-table Testing of Nonstructural Components," 2015.

[8] Pacific Earthquake Engineering Research Center, *Strong Motion Database*(1995 Takatori Station, Kobe, Japan), Retrieved Jul. 20, 2020, <https://ngawest2.berkeley.edu>

[9] J. D. Jin and I. W. Lee, "Implementation of a PV-WiFi module for wireless string monitoring of photovoltaic based on WiFi communication," *J. KICS*, vol. 45, no. 11, pp. 1940-1954, Nov. 2020.

이 경 석 (Kyeongseok Lee)



2019년 2월 : 경남과학기술대학교 전자공학과 졸업
 2019년 9월~현재 : 부산대학교 전기전자공학과 석사과정
 <관심분야> Embedded system, Internet of Things
 [ORCID:0000-0001-5409-2965]

서 정 빈 (Jeongbin Seo)



2019년 2월 : 부산대학교 전자
공학과 졸업

2019년 3월~현재 : 부산대학교
전기전자공학과 석박사통합
과정

<관심분야> Index Modulation,
Machine Learning, MIMO

[ORCID:0000-0001-9675-1594]

김 석 찬 (Suk Chan Kim)



1993년 2월 : 부산대학교 전자
공학과 졸업

2000년 2월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과 석사
및 박사

2002년 3월~현재 : 부산대학교
전자공학과 교수

<관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 수중통신, 사
물인터넷, 인공지능

[ORCID:0000-0002-5699-5865]