

# 모아레 현상을 이용한 영상기반 파이프 서포트 변위측정 방법

박준범<sup>1</sup> · 박세미<sup>2</sup> · 김재현<sup>3</sup> · 김정렬<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 건축공학과 석사과정 · <sup>2</sup>인하대학교 건축공학과 석사과정 · <sup>3</sup>인하대학교 건축공학과 학사졸업 · <sup>4</sup>인하대학교 건축공학과 교수

## A Vision-based Pipe Support Displacement Measurement Method Using Moiré Patterns

Park, Junbeom<sup>1</sup>, Park, Semi<sup>2</sup>, Kim Jaehyeon<sup>3</sup>, Kim, Jungyeol<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Architecture, Inha University

<sup>2</sup>Graduate Student, Department of Architecture, Inha University

<sup>3</sup>Bachelor of Science, Department of Architecture, Inha University

<sup>4</sup>Professor, Department of Architecture, Inha University

**Abstract :** It is very important to measure the displacement of a structure to evaluate the safety of the structure. This study shows a methodology to measure the displacement to determine the stability of a structure when it is damaged by loads. The methodology used Moiré's phenomenon and was verified through experiments. The experiments utilized pipes to simulate the pipe supports in the construction site and measured the vertical displacement of the Moiré interference patterns according to the horizontal displacement of the pipes. Experiments confirmed that the linear relationship between horizontal displacement of pipes and vertical displacement of Moiré patterns and derive a relational expression. In conclusion, the methodology presented in this work allows us to simultaneously measure a number of vertical members' displacements regardless of distance and determine the safety of the structure.

**Keywords :** Moiré Pattern, Pipe Support, Displacement Measurement, Collapse Forecasting, Safety

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

건설현장은 건설업 특성상 고소작업, 중량물 운반 작업, 붕괴 등 사고에 노출이 되어 있다. 그중에서 가설공사에 의해 시공된 구조물은 임시로 설치되어 본 공사가 종료되면 철거를 해야 하는 구조물로 그 특성상 시공이 완료되면 영구적으로 존재하는 본 구조물과 비교하였을 때 구조물 연결부의 견고함에서 차이가 있다. 또한, 가설공사에 사용되는 자재를 재사용하는 과정에서 자재에 대한 관리부실 등 가설 구조물의 성능에 대한 불확실성이 발생하며 이러한 요인들로 인해 가설구조물의 붕괴사고가 지속적으로 발생하고 있다. 실제로 건설공사 안전관리 종합정보망의 위험요소 프로

파일 통계에 따르면, 18개의 공중 가운데 가설공사에서 전체의 약 30%의 해당하는 위험요소가 도출되었으며 물적피해 현황에서는 붕괴사고에 의한 물적피해가 전체의 약 40%로 가장 많은 부분을 차지했다(건설공사 안전관리 정보망 통계자료, 2020). 이러한 통계는 아직 건설현장에서 가설구조물에 의한 붕괴사고를 예방하지 못하고 있다는 것을 의미하며 특히 붕괴나 전도에 의한 사고는 다른 종류의 사고와 비교했을 때 물질적, 인명적 피해가 클 뿐 아니라 사고 원인이 가설구조물과 직접적인 관련이 있으므로 가설구조물의 붕괴사고를 감지하고 예방할 수 있는 방안이 필요하다.

이에 따라 가설구조물의 안전성 및 사용성 보증을 위하여 구조 안전성 모니터링(Structural Health Monitoring; SHM) 개념을 가설구조물에 적용하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이들 구조 안전성 모니터링의 핵심은 구조물의 변형을 계측하는 것이다(Oh et al., 2014; Kim & Park., 2016; Lee et al., 2019). 구조물은 하중을 받거나 외부요인으로부터 피해를 입었을 경우 비정상적인 변형과 변위가 발생하게 되며 이때 구조물의 변위를 측정하여 모니터링하는 것

\* **Corresponding author:** Kim, Jung Yeol, Department of Architecture, Inha University, Incheon 22212, Republic of Korea

**E-mail:** jungkim@inha.ac.kr

**Received** September 29, 2021; **revised** December 13, 2021

**accepted** December 14, 2021

으로 붕괴의 징후를 사전에 감지할 수 있다.

한편, 파이프 서포트는 가설공사에서 사용되는 구조물 중 하나로 건설현장에서 슬라브의 콘크리트 타설을 위해 슬라브 거푸집의 아래부분을 받쳐주어 지지하는 역할을 한다. 따라서 파이프 서포트는 붕괴사고와 밀접한 관계를 갖는 자재라고 할 수 있으며 최근에는 대형 건설현장에서 적용하기 적합하도록 규격화된 시스템 동바리로 인해 대형 건설현장에서의 사용이 줄었지만 소형 건설현장에서는 아직까지 보편적으로 사용되고 있다. 파이프 서포트가 주로 사용되는 소형 건설현장은 대형 건설현장과 비교하였을 때 안전사고에 대한 경각심이 낮고 부족한 예산 등의 이유로 사고 예방에 대한 관리가 미흡한 실정이다(Chen, 2015).

따라서 본 연구는 가설구조물의 일종인 파이프 서포트의 붕괴사고 예방을 위해 현장 적용성을 고려한 파이프 서포트의 변위측정 방법을 제시한다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 가설구조물 중에서 파이프 서포트를 대상으로 하며 연구의 최종 목적은 다수의 파이프 서포트의 변위를 실시간으로 자동 계측하여 모니터링하고 관측되는 변위에 따라 파이프 서포트의 붕괴를 감지하는 것이나 이 논문은 그 초기연구로 파이프 서포트의 변위를 측정할 수 있는 새로운 방법론을 제시하고 그에 대한 실험실 조건의 검증만을 포함한다.

본 연구는 다음과 같은 절차로 진행한다.

첫째, 가설구조물의 붕괴 감지에 관한 선행연구의 고찰을 진행하였다.

둘째, 파이프 서포트의 붕괴를 감지할 수 있는 수준의 분해능과 건설현장 실무 적용 가능 여부 등을 고려한 파이프 서포트의 변위측정 방법론을 제시하였다.

셋째, 실험을 통하여 제시한 방법론의 검증을 진행하였다.

## 2. 기술 동향

### 2.1 국·내외 기술 동향

가설구조물의 붕괴를 감지하기 위한 변위측정 및 모니터링기술의 필요성은 지속적으로 언급되고 있다.

Chae et al. (2017)은 가설구조물의 사고사례 분석을 통하여 사고예방 대책을 제시하고 가설구조물의 변위 발생 방지의 중요성에 대해 언급하였으며 Lam et al. (2017)은 가설구조물의 붕괴를 감지하기 위한 변위측정 방법으로 IoT 기술들을 소개하며 가설구조물의 안전관리 및 사고에 의한 피해 감소를 위하여 가설구조물의 변위측정의 중요성을 언급하였다. 이처럼 다양한 연구에서 가설구조물의 안전관리 및 붕

괴 감지에 있어서 변위측정의 중요성을 강조하고 있다.

구조물의 변위를 측정하는 방법은 크게 센서를 사용하는 방법과 영상을 사용하는 방법으로 구분된다. 변위측정 센서 장비는 대표적으로 LVDT (Linear Variable Differential Transformer)와 같은 접촉식 센서, 그리고 LDV (Laser Doppler Vibrometer) 또는 GPS (Global Positioning System)와 같은 비접촉식 센서를 이용한다.

접촉식 센서를 사용한 경우 Lam et al. (2019)은 비계를 대상으로 가속도 센서를 부착하여 IoT 시스템을 구축하고 실시간으로 변위를 측정, 모니터링하는 것으로 IoT를 기반으로 한 모니터링 방법의 효율성에 대해 언급하였다. Park (2018)은 동바리를 대상으로 동바리 상부에 압력센서를 부착하여 동바리에 내려오는 수직하중을 측정하고 모니터링하는 시스템을 제시하였으며 대우건설(2020)은 기울기 센서를 이용한 동바리 모니터링 시스템을 개발하고 실험을 통해 특정 기울기 값에 따라 안전, 주의, 위험, 붕괴 단계로 구분하여 실시간 동바리 붕괴 위험 모니터링이 가능하도록 하였다.

비접촉식 LDV 센서의 경우 독일 Polytec ‘장거리/고분해능 스캐닝 LDV 등 다양한 제품 개발’, 미국 MetroLaser ‘동시에 16개 지점이 측정이 가능한 LDV 개발’, 미국 Univ. of Wisconsin-Madison ‘스캐닝 LDV의 자유진동 응답을 이용한 모달 특성 산정’, 영국 Imperial College ‘스캐닝 LDV의 속도 측정을 통한 모달 특성 연구’, 일본 도쿄대학교 ‘상시진동 하에서 LDV를 이용한 교량 손상평가’ 등 고성능 기기를 활용한 연구가 진행되고 있다(국토교통과학기술진흥원, 2018). Hwang (2015)은 슬라브 거푸집 하부에 레이저 센서를 부착하여 거푸집 변위를 측정하는 것으로 거푸집 붕괴 경고 시스템을 제시하였으며 Kim et al. (2021)은 소규모 건설현장을 중심으로 레이저 거리측정기를 사용한 흙막이 구조체의 변위 계측 및 추적관리 시스템을 개발하는 것으로 흙막이 구조체의 특성에 따라 레이저 센서의 활용을 통해 기술의 현장 적용성을 확보하였다.

비접촉식 GPS 센서의 경우 미국 Univ of California ‘지진시 발행하는 대량의 지반 변위를 GPS와 가속도계의 융합으로 산정하는 기술 개발’, 그리스 Patras Univ. ‘가속도 데이터를 이용한 GPS변위 데이터 잡음소거 기법을 개발’, 홍콩 Hong Kong Polytech Univ. ‘경험적 모드 분석법과 적응 필터를 이용한 GPS(가속도계 데이터 융합)기법 개발’ 등 연구가 이루어지고 있으며(국토교통과학기술진흥원, 2018), Kang et al. (2018)은 GPS기반의 실시간 댐 변위 계측 시스템을 제시하고 현장적용을 실시하였다.

영상기반 변위측정의 경우 일본 Hiroshima Univ. ‘10,000 fps의 고속 카메라를 이용한 실시간 변위 추정’, 이탈리아 Poltecnico di Milano ‘영상 기반 진동 측정을 통한 구조물의

동특성 파악', 미국 Univ. of Massachusetts Lowell '카메라 2대로 계측한 풍력발전기 운영 데이터를 이용한 형상 정보를 추출' 등의 영상기반 계측연구가 진행되고 있으며(국토교통과학기술진흥원, 2018), Xu et al. (2017)은 토목 구조물을 대상으로 변위측정을 위한 영상기반 방법론을 검토하고 영상기반 시스템을 비용, 설치, 다중 측정 등에서 이점을 가지며 구조물 변위측정을 위한 전망있는 기술로 언급하였다. Choi and Kim (2016)은 이미지 자체의 특징점을 추출하며 목표대상물과 카메라와의 수평거리, 카메라의 초점거리, 카메라 센서의 pixel 크기를 이용한 변위측정 방법을 제시하였으며 Kang et al. (2017)과 Kim (2021)은 마커를 사용한 영상기반 구조물 변위측정 방법을 제시하고 영상기반 변위측정의 공통적인 문제점인 장거리측정, 카메라 왜곡 및 카메라 움직임, 조도환경 등의 문제점을 해결하기 위한 연구를 진행하였다.

### 2.2 국·내외 동향 조사에 대한 결론

접촉식 센서의 경우 높은 성능과 정확도로 구조물의 변위를 측정할 수 있는 반면 유선센서의 경우 복잡한 현장에서 배선의 문제가 있고 무선센서의 경우 전력 공급 및 통신 불량 등의 문제가 있다. 또한, 파이프 서포트를 대상으로 했을 때 다수의 파이프 서포트의 변위를 개별적으로 동시에 측정해야 하는 특성상 고가의 장비와 개별 센서를 각각 부착해야 하는 점에서 접촉식 센서를 이용한 방법은 부적절하다고 판단된다.

비접촉식 LDV 센서의 경우 접촉식 센서와 마찬가지로 높은 성능을 가지는 장비를 통해 넓은 영역의 변위를 측정가능하나 이 역시 다수의 파이프 서포트를 대상으로 하기에는 부적절하다. GPS 센서의 경우 교량과 같은 대형구조물의 거동 측정에 활용하기 위한 연구가 진행되었지만 성능의 측면에서 파이프 서포트의 붕괴를 감지할 수 있을 정도의 미세 변위를 측정하기에는 그 오차가 크기 때문에 비접촉식 센서를 이용한 방법 또한 부적절하다.

영상기반의 변위측정 방법은 센서를 이용한 방법과 비교하였을 때 비용이 적게 들고 절차가 간편하며 최근 기술의 발달로 인해 높은 정확도를 보인다. 하지만 비마커 형식의 영상기반 변위측정 방법은 영상내의 특징점을 매칭하는 과정에서 오류발생 가능성이 있고 카메라와 목표물 사이의 거리 등 추가 정보를 입력해야 한다는 점에서 다수의 파이프 서포트를 대상으로 하기에는 부적절하다. 마커 형식의 영상기반 변위측정 방법은 마커를 통해 별도의 입력사항 없이 사용 가능하고 오류가 적으며 카메라를 통해 인식한 모든 마커에 대해 변위측정이 가능하다는 점에서 파이프 서포트를 대상으로 하기에는 가장 적절하다고 판단된다. 하지만 기존

연구에서 제시하고 있는 마커는 정확도 확보를 위한 마커로 현장 사용성에 대해서는 보안을 필요하며 마커의 방향에 따라 카메라의 방향이 제한된다는 한계점이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 파이프 서포트를 대상으로 0기준 마커형식의 영상기반 변위측정 방법의 한계점인 현장 적용성을 보완할 수 있는 새로운 방법을 제시한다.

## 3. 변위측정 개념

### 3.1 모아레(Moiré) 현상

'모아레 현상'은 파동의 성질을 가지고 있는 빛의 간섭 현상으로 '맥놀이 현상'과 같은 원리로 발생한다. '맥놀이 현상'이란 진동수가 비슷한 두 개의 파동이 서로 영향을 미쳐 진동수의 폭이 일정한 주기로 변하는 현상이다. (Fig. 1)은 같은 진동수의 파동이 간섭하였을 때와 진동수의 미세한 차이가 있는 파동이 간섭해 맥놀이 현상이 일어나는 그래프를 나타내고 있다.

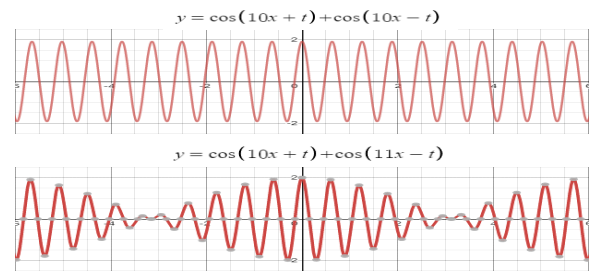


Fig. 1. Beat phenomenon

맥놀이 현상과 같은 원리로 '모아레 현상'은 일정한 간격을 반복하는 무늬가 겹쳐지면서 간섭하게 되고 그 결과 생기는 무늬를 의미하며 (Fig. 2)는 그 예시를 나타낸다.

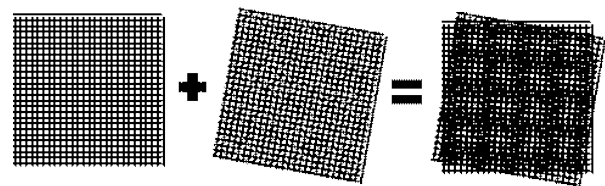


Fig. 2. Moiré patterns

### 3.2 모아레(Moiré) 현상을 이용한 변위 측정 원리

(Fig. 3)는 '모아레 현상'의 원리를 나타내고 있다. (a)는 주기가 p인 직선 격자이고, (b)는 격자 (a)와 동일한 주기를 가지며 반시계 방향으로  $\theta$  만큼 회전되어 있는 격자이다. 이 두 개의 격자를 겹쳐서 (c)와 같은 모아레 무늬가 발생하며 이 모아레 무늬에서의 주기 P는 식(1)과 같은 관계로

$$P = \frac{p}{2\sin(\frac{\theta}{2})} \quad (1)$$

$P$ : 수평방향 이동간격  
 $p$ : 무아레 무늬 간격  
 $\theta$ : 무아레 무늬 각도

격자 자체의 주기  $p$ 보다 월등히 큰 값을 가지게 된다.

이러한 주기의 차이는 무늬의 격자가 이동할 때 확인 할 수 있는데 (c)와 같은 상태에서 격자 (a)를  $p$ 만큼 수평방향으로 이동하면, (d)와 같은 모아레 무늬가 얻어지는데, 결국 격자 자체의 이동량을 무늬의 이동으로  $1/2\sin(\theta/2)$  배 만큼 증폭시키는 효과를 갖게 된다(Park, 2000).

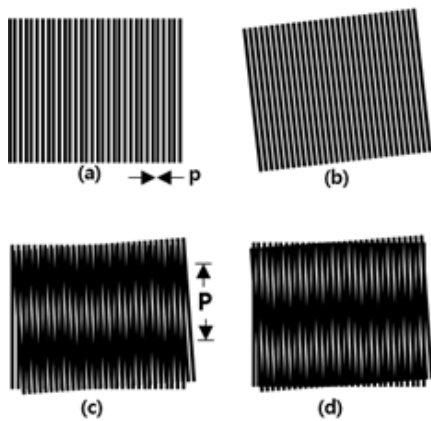


Fig. 3. A Principle of Moiré phenomenon

따라서 모아레 현상이 가지는 일반적인 성질(변위의 증폭)을 이용하여 물체의 거동 해석이나 물체의 비접촉 형상 측정 분야의 응용이 가능하며 본 연구에서는 파이프 서포트의 미세한 변위를 모아레 간섭무늬를 통해 측정하는 방법을 제시한다.

#### 4. 변위측정 방법론

##### 4.1 방법론

(Fig. 4)는 방법론 적용을 위해 파이프 서포트에 제작된 모아레 마커를 부착한 모습을 나타낸다. 그림과 같이 모아레 마커를 파이프 서포트에 부착하고 설치된 파이프 서포트를 일정 거리에서 카메라를 이용하여 촬영한다. 그림의 마커는 본 연구의 대상인 파이프 서포트에 적절하도록 수직 방향으로 제작되어 있으나 모아레 무늬의 제작 방향에 따라 수평 또는 수직 변위를 측정할 수 있다. 또한, 파이프 서포트를 모아레 마커가 둘러싸고 감싸고 있으므로 어떠한 방향에서 촬영을 해도 마커를 인식할 수 있다는 점에서 기존 방법론의 마커와 비교하였을 때 현장 사용성이 우수하다고 할 수 있다.

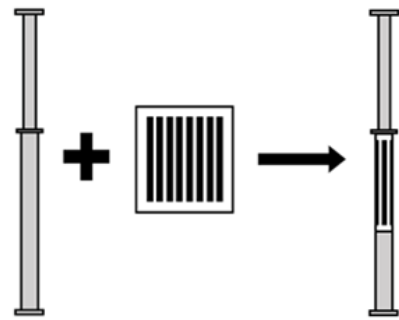


Fig. 4. A Pipe support with Moiré marker

(Fig. 5)는 촬영된 영상 속 파이프 서포트에 부착된 모아레 마커와 간섭을 나타낼 또 하나의 모아레 무늬를 영상작업을 통해 삽입시키는 과정을 나타낸다. 영상작업을 통해 삽입한 무늬와의 간섭무늬는 더욱 선명하게 나타나며 다른 하나의 무늬를 따로 설치할 필요가 없다는 점에서 현장 적용에 유용하다고 할 수 있다.

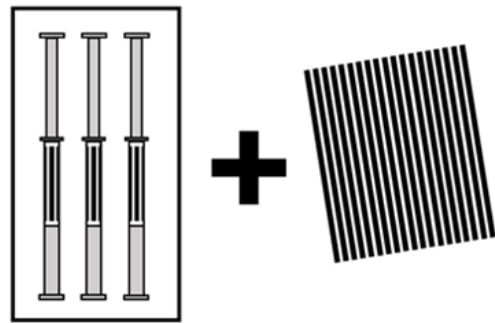


Fig. 5. Image processing through filter insertion to create Moiré patterns

(Fig. 6)는 최종적으로 관측이 필요한 모아레 간섭무늬를 나타낸다. 파이프 서포트에 부착한 마커와 영상작업을 통해 삽입한 무늬가 모아레 현상에 의해 서로 간섭하여 간섭무늬가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

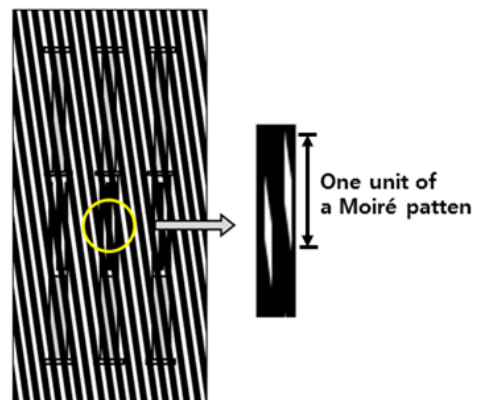


Fig. 6. Moiré interference patterns that require observation

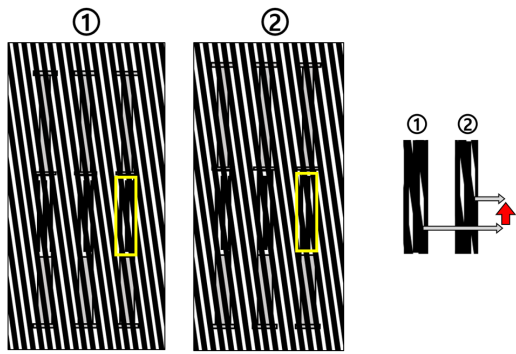


Fig. 7. Vertical movement of a interference pattern according to the horizontal displacement of a pipe support

〈Fig. 7〉의 ①은 파이프 서포트의 수평 이동 전의 모습이 고 ②는 수평 이동 후의 모습이다. 파이프 서포트가 여러 요인에 의해 수평 이동할 때 간섭무늬는 그 변위보다 증폭된 만큼의 변위로 수직 이동하게 된다. 모아레의 원리에 따라 파이프 서포트의 수평 이동 변위와 간섭무늬의 수직 이동 변위는 일정한 관계식을 가지며 관계식은 간섭무늬의 변위를 이용하여 파이프 서포트의 변위를 산출할 수 있다는 것을 의미한다.

#### 4.2 측정 대상과 카메라 사이의 거리

해당 방법론은 카메라를 이용하는 방법으로 앞서 언급한 것처럼 모아레 마커가 파이프 서포트를 감싸고 있으므로 카메라의 촬영 방향에서는 자유로우나 카메라의 설치 위치에 따라 모아레 간섭무늬의 변화량이 다르게 산출될 우려가 있다. 즉, 카메라를 고정하여 촬영할 경우 각각의 부재와 카메라의 거리는 모두 다르기 때문에 각각의 부재와 카메라 사이의 거리를 동시에 측정하여 적용해야 한다. 이러한 문제점은 영상을 기반으로 하는 방법의 공통적인 문제점이나 마커를 사용할 경우 비교적 간편하게 해결가능하다. 방법론에서는 파이프 서포트에 부착하는 마커의 세로길이를 500mm로 일정하게 하고 카메라에 포착되는 마커의 길이를 이용해 카메라와 파이프 서포트 사이의 거리를 산출하였다. 각각의 파이프 서포트에 부착된 마커를 포착하여 분석하는 과정에서 동시에 거리산출을 진행할 수 있기 때문에 별도의 센서를 사용하는 방법에 비해 간편하다고 할 수 있다.

### 5. 실험

#### 5.1 실험 가정

실험에서는 파이프 서포트와 동일한 지름의 파이프를 사용하여 실험을 진행하였다. 파이프 서포트의 안전성을 판단하는 방법중 기울기의 변화를 관측하는 것이 의미 있으며

기울기 변화는 파이프 서포트 취약부의 수평 변화를 의미한다. 따라서 실험 진행 시 파이프가 수평으로 변화한다고 가정 후 실험을 진행하였다.

#### 5.2 실험 과정 및 방법

〈Fig. 8〉은 실험 Setting 모습이다. 본 연구의 실험은 최대 해상도 4032×2268 pixel의 핸드폰 카메라를 사용하였다. 또한, 실제현장과 유사한 형태의 조건을 맞추기 위해 파이프 서포트와 같은 크기인 외경 60mm, 길이 2m의 파이프를 사용하였으며 파이프에 마커(모아레 현상을 위한 격자무늬)를 부착하였고 마커는 너비 15mm, 간격 15mm, 세로길이 500mm의 격자를 사용하였다. 부착하는 마커의 너비와 간격은 실험 결과에 영향을 주지 않으므로 모의실험 중 가장 관측능성이 뛰어난 마커를 사용했으나 카메라 거리산출을 위해 세로길이는 500mm로 고정하였다. 실험 진행을 위해 파이프의 바닥 부분과 수평 이동이 가능하도록 제작한 합판이 일체 거동할 수 있도록 고정하였으며 합판을 수평 이동시켜 파이프의 변위를 표현하였다. 촬영은 카메라와의 거리 2m~8m까지 1m 간격으로 진행하였으며 파이프의 수평 변위는 1~10mm까지 1mm 단위로, 12~20mm까지는 2mm 단위로 변화시켜 총 15개의 변위를 각각 4회씩 촬영하였다.



Fig. 8. Experiment Settings

〈Fig. 9〉는 영상작업 전후의 모습이며 파이프에 부착한 모아레 마커와 영상작업을 통해 삽입한 모아레 격자가 간섭무늬를 형성하는 것을 확인할 수 있다. 격자 기울기는 작을수록 큰 증폭이 나타나지만 관측 가능한 수준의 적절한 기울

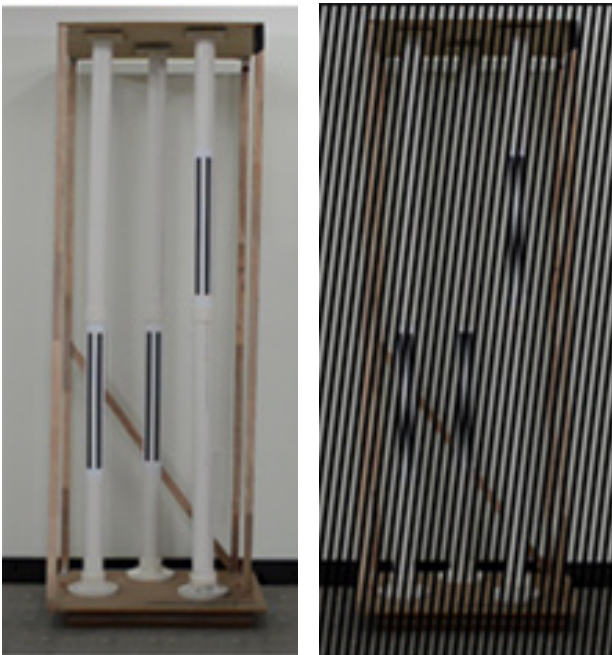


Fig. 9. Photos of before and after image processing tasks

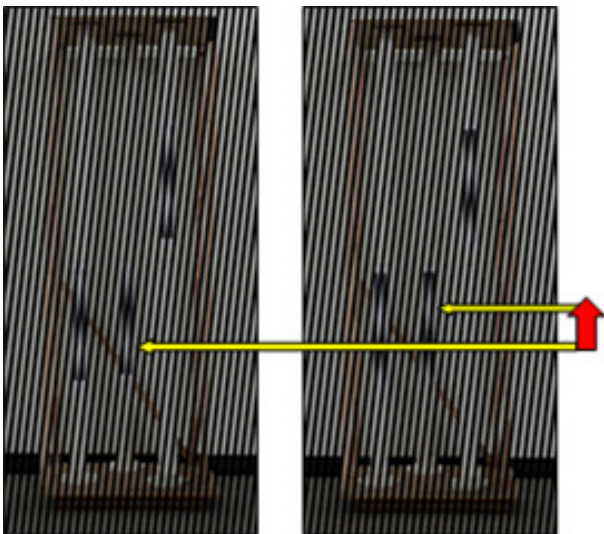


Fig. 10. Photos of before and after horizontal displacement changes

기를 적용하는 것으로 모든 영상에 동일하게 8° 기울인 격자무늬를 사용하였다.

〈Fig. 10〉는 파이프의 수평 변화 전후의 모습이다. 각 영상에서 나타나는 파이프의 수평 이동 변위에 따른 모아레 간섭무늬의 수직 이동 변위를 컴퓨터를 이용해 픽셀 단위로 계산하였다.

### 5.3 실험 결과

실험 결과 파이프의 수평 이동 변위에 따른 모아레 간섭무늬의 수직 이동 변위(Pixel 수)가 〈Fig. 11〉과 같이 나타났

다. 파이프의 수평 이동 변위에 따른 모아레 간섭무늬의 수직 이동 변위가 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있으며 직선은 결과값을 회귀분석하여 얻은 직선이다. 각각의 직선식에서는 y절편이 존재하는데 이는 실험 오차에 의한 것으로 판단되며 이론상으로 0이 되어야 한다. 더욱 정밀한 측정과 계산을 통해 실험을 진행한다면 그 값이 무시할 수 있을 정도로 작아질 것으로 예상된다.

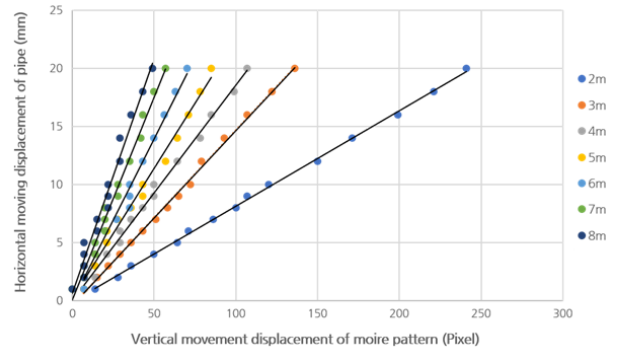


Fig. 11. Graphs of experiment results

〈Table 1〉은 카메라 거리에 따른 측정 변위의 분해능을 나타낸다. 위 값은 각각의 거리에서 측정 가능한 최소변위 (mm/pixel)를 의미하며 이는 카메라의 해상도에 따라 성능이 달라지기 때문에 높은 해상도의 카메라를 사용할 시 성능향상을 기대할 수 있다.

Table 1. Measurement displacement resolutions according to camera distances (Unit : mm)

Camera distance	Measurement displacement resolution (mm/pixel)
2m	0.56
3m	1.03
4m	1.30
5m	1.65
6m	2.06
7m	2.46
8m	2.86

### 5.4 실험 결과 분석

실험을 통해 얻어진 각 변수들의 관계식을 식(2)로 나타낼 수 있다. 실험 결과에 따라 파이프의 수평 변위에 따른 간섭무늬의 수직 변위가 측정 가능하며 일정한 선형 직선의 관계식을 만족하므로 이는 반대로 선형직선 기울기와 간섭무늬 수직 변위를 이용하여 파이프의 수평 변위 산출이 가능하다는 것을 의미한다.

〈Fig. 13〉은 카메라 거리에 따른 선형직선의 기울기(A)를

$$y = Ax \quad (2)$$

$y$  = 파이프 수평변위  
 $A$  = 선형직선기울기  
 $x$  = 간섭무늬수직이동변위(픽셀)

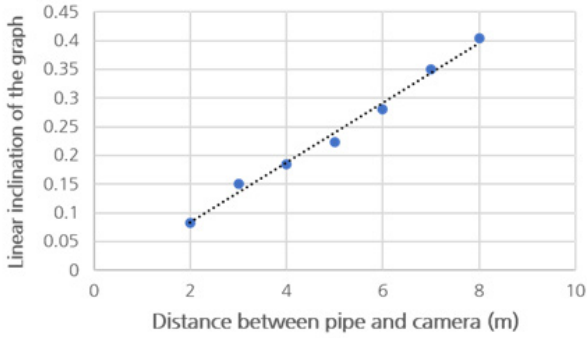


Fig. 13. Linear inclination of the graph according to camera distances

$$A = 0.0521S - 0.0212 \quad (3)$$

$A$  = 선형직선기울기  
 $S$  = 카메라거리 (m)

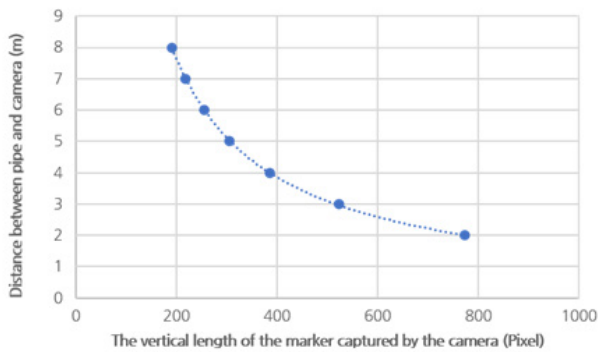


Fig. 14. Camera distances according to measured marker lengths

$$S = 1411x^{-0.985} \quad (4)$$

$S$  = 카메라거리 (m)  
 $x$  = 측정된 마커 세로길이

나타낸다. 분석결과 두 개의 변수가 식(3)과 같이 선형직선의 관계를 가진다. 다음 관계식을 통해 임의의 거리에서의 선형직선 기울기(A)를 산출할 수 있다.

선형직선의 기울기(A) 산출에 필요한 카메라와 파이프 사이의 거리는 앞에서 언급한 것처럼 파이프에 부착한 마커의 세로 길이를 일정하게 유지했으므로 이것을 이용하여 그 거리를 측정할 수 있다. <Fig. 14>는 카메라에 포착된 마커의

세로길이 측정값(Pixel)에 따른 파이프와 카메라 사이의 거리를 나타낸다. 분석결과 두 개의 변수가 식(4)과 같은 관계식을 가진다. 다음 관계식을 통해 파이프와 카메라 사이의 거리(S)를 산출할 수 있다.

결과적으로 실험에서 사용한 거리 이외의 임의의 거리를 적용하더라도 그 기울기 값을 도출할 수 있으며 기울기 값과 간섭무늬의 변화량(Pixel 수)을 통해 파이프의 수평 이동 변위를 산출할 수 있다. 실험에서는 간섭무늬의 변화량을 수작업을 통해 계산했으나 현장 적용에 있어서 자동화 프로그램을 제작하여 사용한다면 그 오차가 줄어들 것이며 모아레 간섭무늬의 증폭된 변위를 측정하기 때문에 기존의 영상을 통한 방법보다 간단한 처리가 가능하다. 하지만 카메라 거리에 따른 선형직선의 기울기 값의 관계식은 더욱 많은 표본과 정밀한 측정을 통해 오차를 줄일 필요가 있다.

### 5.5 실험 결과 적용 알고리즘

<Fig. 15>는 파이프 서포트의 수평 변위를 산출하는 알고리즘을 나타낸다. 파이프 서포트의 수평 변위를 산출하기 위해 필요한 요소는 모아레 간섭무늬의 수직 이동 변위와 거리에 따른 선형직선의 기울기이다. 각각의 요소는 독립적인 알고리즘의 과정을 통해 얻어 지지만 자동으로 간섭무늬의 수직 이동 변위를 측정하기 위해서는 우선적으로 부재에 부착한 마커를 인식해야 한다. 그 과정에서 선형직선의 기울기 값 도출에 필요한 마커의 세로길이를 측정할 수 있으므로 알고리즘의 과정이 단축되고 현장 적용에 있어서 용이할 것으로 판단된다. 최종적으로 산출된 파이프 서포트의 수평 변위에 대해 설정된 임계값 이상의 변위가 검출될 경우 해당 파이프 서포트 정보와 붕괴 위험 정보를 얻는 것으로 파이프 서포트의 붕괴를 감지할 수 있다.

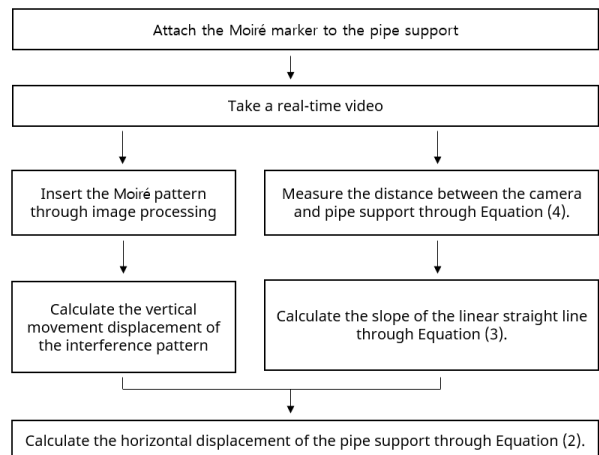


Fig. 15. An Algorithm to calculate a horizontal displacement of a pipe support

## 6. 결론

본 연구는 모아레 현상을 이용하여 파이프 서포트의 수평 변위를 측정하는 방법론의 기본 개념을 제시하고 검증하였다. 실험 결과에 따르면 파이프의 수평 변위에 따른 모아레 간섭무늬의 수직 이동 변위가 선형적인 직선 관계를 갖는 것을 확인하였으며 카메라 거리에 따른 직선의 관계식을 통해 임의의 거리에서의 수직부재의 수평 변위측정이 가능하다. 본 방법론은 마커를 사용한 기존의 변위측정 방법과 비교하여 현장 사용성에서 우수하므로 실제 현장에 적용했을 때 파이프 서포트의 붕괴를 감지하고 그로 인한 사고를 예방하는 것에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 7. 한계점

방법론에서 제시된 그래프와 식은 각각의 변수들이 규칙성을 가지고 있다는 것을 의미하나 표본을 늘리고 더욱 정밀한 측정을 통하여 오차율을 현장 적용에 가능한 수준으로 낮추는 과정이 필요하다. 또한, 파이프 서포트의 수평변위만을 고려하는 실험 가정에 대한 검증이 필요하며 실제로 파이프 서포트의 거동은 360도 모든 방향으로 발생할 수 있으나 실험에서는 카메라와 수평 방향으로의 변위만을 고려하였으므로 이에 대한 추가 검증이 필요하다. 또한, 현장 적용에 있어서 영상기반 방법의 공통적인 문제인 카메라 왜곡 문제를 해결해야 할 것이다. 본 연구는 제한된 실험 환경에서 진행되었으므로 향후 간섭무늬 측정의 자동화를 통한 파이프 서포트 자동 붕괴감지 시스템 개발 연구와 그에 따른 현장 적용 실험을 수행할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(21CTAP-C152144-03).

## References

Chae, S.M., Song, H.B., Lee, C.H., Woo, W.T., and Chung, K.R. (2017). "Accidents in Falsework System and Accident Prevention." Autumn Annual Conference of AIK, AIK 37(1), pp. 785-786.

Chen, T.H. (2015). "Problem Analysis and Improvement Plan for Safety Management of Small-Scale Construction Sites." Majorin Construction Business Administration Graduate School of Construction Engineering, Chung-Ang University

Choi, I.S., and Kim, J.H. (2016). "Measurement of Dynamic Characteristics on Structure using Non-marker Vision-based Displacement Measurement System." *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 29(4), pp. 301-308.

Construction Safety Management Integrated Information "Hazard Profile" (Sep. 8, 2020). (<https://www.csi.go.kr/index.do>)

Kang, G.C., Kim, S.J., Ryou, M., Ahn, K., and Kim, J. (2018). "Case Study on Real-time Monitoring System of Dam Displacement Based on SAMP(Single Antenna-Multi Point) GPS." *Journal of the Korean Cadastre Information Association*, 20(2), pp. 3-13.

Kang, I.M., Lee, S.H., and Shin, K.J. (2017). "Real-Time Displacement Measurement and Collapse Forecasting System using Image Processing." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 33(1), pp. 27-32.

Kim, T.H., and Park, K.T. (2016). "Development of Statistical/Probabilistic-Based Adaptive Thresholding Algorithm for Monitoring the Safety of the Structure." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(4), pp. 1-8.

Kim, J.S., Kim, C.W., and Kim, Y.S. (2021). "Development of a Pilot Type for Measuring and Monitoring the Displacement of Retaining Structure Based on a Rotary Laser Distance Sensor - Focused on Small Construction Sites -." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 37(1), pp. 219-227.

Kim J.S. (2021). "Improvement of a Marker-based Single Photogrammetry Model for Detection of Falsework Collapse." Dept. of Civil and Environmental System Engineering, SUNGKYUNKWAN University, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, KAIA (Mar. 29, 2019) "Development of real-time monitoring technology based on image analysis for prediction of collapse of structures during construction and demolition." p. 6.

Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, KAIA (Aug. 2, 2018). Development and commercialization of 6DOF structural precise response estimation through data fusion of acceleration and measurements in order to improve structural stability.

Lam, R.C.Y., Junus, A., Cheng, W.M.Y., Li, X., and Lam, L.C.H. (2017). "IoT Application in Construction and Civil Engineering Works." International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), IEEE, Las Vegas, NV, USA, pp. 1320-1325.

Lam, R.C.Y., Lam, L.C.H., Li, N.X., Chu, D.L.M., and Lee, P.K.K. (2019). "IoT Enabled Falsework Monitoring System for Construction Safety Enhancement." 2019



- International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), IEEE, Las Vegas, NV, USA, pp. 1208-1213.
- Lee, H.S. (2019). "A Study on the Safety Evaluation of the Landing Pier Structure Using FBG Sensor." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(2), pp. 44-50.
- Oh, B.K., Lee, J.H., Choi, S. W., Kim, Y.S., and Park, H.S. (2014). "A Strain based Load Identification for the Safety Monitoring of the Steel Structure." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(2), pp. 64-73.
- Park, Y.C (2000), "The principle and application of Moiré phenomenon." *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 17(6), pp. 25-31.
- Patent registration KR101928332B1 (Mar. 29, 2018). Temporary Structure Failure Detection Monitoring Device.
- Patent registration KR1020200041922 (April. 4, 2020). System for real-time monitoring collapse risk of support and Method thereof.
- Patent registration KR101689268B1 (Mar. 31, 2015). Concrete mold collapse alarm system using LASER transmitter and LASER receiver.

---

**요약 :** 본 연구는 구조물이 하중과 외부요인으로부터 피해를 받을 경우 구조물의 안정성을 판단하기 위해서 발생하는 변위를 측정하는 방법론을 제시하고 실험을 통한 검증을 보여준다. 변위측정은 모아레의 원리를 이용 하였으며 이를 통해 구조물의 미세한 변위를 증폭하여 관찰 할 수 있다. 실험은 실제 현장의 파이프 서포트와 동일한 지름의 파이프를 사용 하였으며 파이프가 수평으로 움직인다는 가정하에 파이프의 수평 변위에 따른 모아레 간섭무늬의 수직 변위를 측정하였다. 실험 결과 파이프의 수평 변위와 간섭무늬의 수직 변위의 선형 관계를 확인하고 관계식을 도출하였다. 추가적으로 카메라를 이용한 방법론을 적용하기 위해 수직부재와 카메라 사이의 거리에 따른 간섭무늬 변위의 관계식을 도출하여 카메라의 위치에 상관없이 방법론을 적용할 수 있게 하였다. 결론적으로 본 연구에서 제시한 방법론을 통해 카메라를 이용하여 거리에 상관없이 다수의 수직부재 변위를 동시에 측정하고 구조물의 안전성을 판단하여 붕괴를 감지할 수 있다.

**키워드 :** 모아레(Moiré), 가설 기자재, 파이프 서포트, 변위측정, 붕괴 감지

---