철골 구조물의 안전성 모니터링을 위한 변형률 기반 하중 식별

A Strain based Load Identification for the Safety Monitoring of the Steel Structure

오 병 관¹⁾
Byung-Kwan Oh

이 지 훈²⁾
Ji-Hoon Lee

최 세 운³⁾
Se-Woon Choi

김 유 석⁴⁾
You-Sok Kim

박 효 선^{5)*}
Hyo-Seon Park

Abstract

This study proposes a load identification for the safety monitoring of the steel structure based on measured strain data. Instead of parameterizing the stiffness of structure in the existing system identification researches, the loads on a structure and a matrix (the unit strain matrix) defined by the relationship between strain and load on structure are parameterized in this study. The error function is defined by the difference between measured strain and strain estimated by parameters. In order to minimize this error function, the genetic algorithm which is one of the optimization algorithm is applied and the parameters are found. The loads on the structure can be identified through the founded parameters and measured strain data. When the loads are changed, the unmeasured strains are estimated based on founded parameters and measured strains on changed state of structure. To verify the load identification algorithm in this paper, the static experimental test for 3 dimensional steel frame structure was implemented and the loads were exactly identified through the measured strain data. In case of loading changes, the unmeasured strains which are monitoring targets on the structure were estimated in acceptable error range (0.17~3.13%). It is expected that the identification method in this study is applied to the safety monitoring of steel structures more practically.

Keywords : Structural health monitoring, System Identification, Strain estimation, Steel Structure

1. 서 론

구조물의 안전성 및 사용성 보증을 위한 구조 건전도 모니터링 (Structural Health Monitoring, SHM) 연구가 활발히 진행 (Lioe and Wong, 2012; Tam et al., 2011; Park et al., 2013)되어 왔고, 시공 중 또는 사용 중인 실제 건물에 적용되고 있다. 지진하중, 풍하중, 중력하중 등에 의해 구조물 또는 구조물을 구성하는 부재에 발생하는 응력을 파악하여 구조물의 안전성 평가를 하게 된다. 구조물 안전성 모니터링은 변형률 계측을 통해 응력을 파악하는 방법으로 이루어진다. 변형률 계측을 통해 산출한 최대응력은 설계기준 (AISC, 2000)에서 제시하는 허용응력과 비교하여 구조물 안전성 지표로서 활용된다.

구조물에 발생한 최대 응력 산출을 위해서는 변형률계를 통해 직접 최대변형률을 계측하거나 최대변형률을 추정하여야 한다. 시공 중 또는 사용 중 발생하는 하중의 변동, 계측 센서 설치 개수의 한계 등의 이유로 최대변형률을 직접 계측하는 것은 매우 어려운 일이다. 이에 부재의 변형률 분포 혹은 최대변형률을 추정하여 구조물 또는 부재에 발생한 최대 응력을 추정하는 연구가 활발히 진행 (Hampshire and Adeli, 2000; Park et al., 2006; Park et al., 2007; Lee and Park, 2013; Choi et al., 2013)되어 왔다. 변형률 기반의 모니터링은 주로 보 부재에 대해 연구가 활발히 진행되어 왔고 보 부재의 최대응력을 산출하기 위한 최대변형률 계측 혹은 추정에 그 초점을 맞추어 진행되어 왔다. 하중의 형태와 위치는 어느 정도 예측할 수 있으며, 대상 부재의 지점 조건 또한

1) 정회원, 연세대학교 건축공학과 박사과정
2) 정회원, 대림산업(주) 기사
3) 정회원, 대구가톨릭대학교 건축공학과 교수
4) 정회원, 연세대학교 건축구조헬스케어연구단 연구교수
5) 정회원, 연세대학교 건축공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : hspark@yonsei.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

알 수 있으므로 구조 역학에 근거한 해석적 방법을 통해 계측한 변형률을 통해 최대변형률의 위치 및 그 값을 추정할 수 있다.

Park et al. (2006), Park et al. (2011)은 각각 LGFOS와 VWSG를 이용하여 보 구조물의 최대 변형률을 추정하는 기법을 제시하였다. 이 두 연구는 크기를 모르는 다양한 하중을 받고 있는 보 구조물의 평균변형률을 계측하여 최대 변형률을 추정하였다. 그러나 센서의 특성상 긴 게이지 길이로 보 특정 구간의 평균변형률 계측을 통해 최대 변형률 값을 추정할 뿐 최대 변형률이 발생하는 위치까지는 제시하지 못하고 있다. Choi et al. (2013)은 FBG센서를 통해 계측한 변형률로 보 구조물의 변형률 분포를 추정하는 기법을 제시하였다. 보 구조물 전체의 변형률 분포를 추정함으로써 최대 변형률 값뿐만 아니라 그 발생 위치도 알 수 있는 기법이다. 이 외에도 다수의 연구가 해석적 방법을 통해 계측 변형률로 구조물의 최대 응력을 추정하는데 초점을 맞추어 수행되어 왔다 (Park et al., 2007; Cho and Kim, 2008; Hahn and Ahn, 2012; Lee and Park, 2013; Choi et al., 2013).

위의 연구들이 제시하는 방법들은 해석상에 가정한 사항이 성립되는 이상적인 상황이어야만 적용이 가능하다. 즉, 위 연구들은 현실적인 모니터링에서 발생하는 불확실 요소들이 반영되지 않은 이론적인 해석적 방법에 기반한 모델들이고 따라서 실제 모니터링에서는 그 적용성이 떨어지게 된다. 먼저, 위 연구에서 제시된 방법들은 하중의 불확실성을 고려하고 있지 않다. 집중하중의 위치는 일반적으로 예측 가능할 지라도 분포 하중을 삼각하중, 등분포 하중 등으로 제한하고 있어 실제 발생하는 불규칙한 형상의 분포하중에 대해서는 그 적용이 불가하다. 또한, 설계 시점에서 제공된 하중 이외에 시공 중 혹은 사용 중 하중의 위치와 크기는 변화할 수 있으며 이에 따라 해석적 방법에 의한 변형률 추정은 더 어려워지게 된다. 지점 조건도 이상적인 힌지 혹은 고정단으로 제한하고 있다. 현실의 어떤 구조물의 접합부 조건을 힌지 혹은 고정단으로 구성하는 것은 불가능한 일이며 접합부 회전 (rotational) 및 이동 (translational)에 대한 강성을 추정하기란 매우 어려운 일이다. 위 해석적 방법에 의한 접근은 접합부 조건에 따라 외부 경간의 모멘트 전달이 달라져 부재의 변형률 변화에 영향을 미치는 현상을 반영하지 못하고 있다. 이 외에도 탄성계수와 같은 재료 물성치, 단면 2차 모멘트와 같은 단면 정보 등에 의한 오차, 부재 설치 시공상의 오차 등도 해석 모델에 의한 변형률 추정을 부정확하게 하는 요소가 된다.

해석적인 방법을 통해 최대변형률 및 최대응력을 추정하는 기존연구들이 위와 같은 한계점들을 갖고 있는 바, 이론적인 구조역학에 근거한 방법이 아닌 회귀 분석적 접근법을 통한 연구가 수행되어 왔다. Lee et al. (2013), Oh et al. (2014)는 각각 보와 다경간 보 부재의 변형률 분포를 특정 다항 함수로 가정하여 계측한 변형률 데이터를 통해 다항 함수의 계수를 찾는 커브피팅을 수행하여 변형률 분포 및 최대 변형률을 추정하였다. 계측한 변형률과 가정한 다항 함수의 추정 변형률 간의 차이를 최소화 하는 다항 함수의 계수를 찾아 변형률 분포를 추정하였다. 계측한 변형률과 추정 변형률 간의 오차를 최소화시키는 방법으로 최소제곱법 (Least Square Method, LSM)을 이용하였다.

위에서 언급한 변형률 분포 혹은 최대변형률 추정에 관한 연구들은 계측한 변형률로부터 구조물 혹은 부재의 최대 응력을 산출하기 위해 직접 변형률 분포 혹은 최대변형률을 추정하고자 하는 연구이다. 이 중 이론적인 역학에 근거한 해석적 방법은 실질적인 모니터링에서 구조물 그 자체의 불확실 요소 (재료, 기하 등)와 주변 상황에 기인한 불확실 요소 (하중, 시공 등)가 배제된 이상적인 접근법이다. 커브피팅에 의한 방법은 이론적인 역학에 근거하지 않고 하중 상황을 예상하고 변형률 분포식을 다항함수로 가정하여 여러 불확실 요소들을 줄일 수 있는 방법에 속한다. 단순보를 대상으로 비교적 적은 오차를 보이며 실제 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 하지만 다경간 연속보 구조물로 그 대상 범위를 확대하여 실험을 수행한 연구 결과에서는 단순보에 비해 비교적 큰 오차가 발생하였고 다경간 연속보의 계측 변형률 분포 또한 해석을 통해 얻은 변형률 분포와 그 양상이 상이한 점을 확인할 수 있었다. 이는 모니터링 대상이 골조 구조물과 같은 복잡한 부정정 구조물로 확대될 경우 불확실 요소가 더 큰 영향을 미쳐 기존의 추정 기법만으로는 구조물의 안전성을 평가하기 어렵다는 것을 시사한다.

계측한 응답을 통해 여러 불확실 요소 중 영향력이 큰 요소를 변수 (parameter)로 설정하여 이를 다양한 기법을 통해 찾아 FE모델에 반영 (update)하는 기법을 시스템 식별 (system identification, SI)라고 한다 (Sanayei et al., 1997). Update된 FE모델은 일부 불확실 요소가 식별된 상태의 보다 현실에 가까워진 구조 해석 모델이라 할 수 있다. 정적 응답에 대해 식별을 수행하는 것을 정적 시스템 식별 (Static System Identification)이라 하며, 업데이트된 (updated) 모델로부터 추출한 정적 응답 (변형률, 변위 등)을 통해 구조물의 안전성 및 손상을 평가할 수 있게 된다.

시스템 식별에서 변수는 여러 불확실 요소 중 가장 큰 영향을 미치는 요소로 설정하게 된다. 구조 분야의 시스템 식별에서는 주로 하중 (Hong et al., 2013), 휨강성, 축강성, 비틀림강성과 같은 구조물의 강성 (Sanayei et al., 1997) 및 접합부/지점 강성 (Jung and Kim, 2011) 등을 변수로 설정하고 이 변수들을 찾는 연구가 진행되어 왔다. Deng and Cai (2010)은 교량의 시스템 식별을 위해 콘크리트의 탄성계수, 밀도, rubber bearing의 탄성계수를 변수로 설정하였고, Li et al. (2010)는 보의 휨강성과 춤을 변수로 설정하였다. Lozano et al. (2013)은 교량의 축강성, 휨강성을, Sanayei and Rohela (2014)는 부재의 축별 (강/약축) 휨강성, 축강성, 탄성계수, 질량 등을 변수로 설정하여 시스템 식별을 수행하였다. FE 모델로부터 추출한 응답 (변형률, 변위)과 구조물 내 동일 위치에서 측정한 데이터 사이의 오차함수를 최소화하는 FE모델의 변수의 값을 찾게 된다. 오차함수의 최소화 문제를 해결하기 위해 유전알고리즘과 같은 최적화 알고리즘을 사용하여 변수를 찾는 연구 (Deng and Cai, 2010; Jung and Kim, 2011; Sanayei and Rohela, 2014)들이 진행되어 왔다. 기존 연구는 주로 보와 같은 단순구조물 및 교량과 같은 토목 구조물을 대상으로 하여 시스템 식별 기법의 제안 및 검증 등의 기초적인 연구가 수행되어 왔다. Perera et al. (2014)은 평면 RC골조로 그 대상을 확장하여 연구를 수행하였지만 대상 구조 시스템이 단순하고 구조물의 규모 및 하중 조건이 제한적이다.

본 연구에서는 철골 골조 구조물의 안전성 모니터링을 위하여 측정한 변형률을 통해 구조물에 작용한 하중을 식별하는 알고리즘을 제안하였다. 기존의 시스템 식별 연구에서 구조물의 강성 등을 변수화한 것과는 다르게, 본 연구에서는 구조물에 작용한 하중과 이로 인해 구조물에 발생하는 변형률 간의 관계를 행렬로 정의하고, 이 행렬 및 작용한 하중을 변수화한다. 측정한 변형률과 변수를 통해 추정된 변형률 사이의 차이를 오차함수로 설정하고 이를 최소화시키기 위해 최적화 알고리즘 중 하나인 유전자 알고리즘을 적용한다. 구해진 변수와 측정한 변형률을 통해 작용한 하중을 식별하고 나아가 미측정 지점의 변형률을 추정한다. 본 연구에서 제안하는 하중 식별 알고리즘을 검증하기 위해 3차원 철골 골조 구조물의 정적 가력 실험을 수행하였고, 측정한 변형률을 통해 가해진 하중을 식별할 수 있었다. 식별된 변수 및 하중을 통해 얻은 응답 (변형률)과 측정한 응답 (변형률)을 비교하여

본 연구가 제안한 식별 기법을 검증하였다.

2. 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm, GA)

본 연구가 제안하는 하중 식별 알고리즘은 구조물에 작용하는 하중과 이로 인해 발생하는 구조물의 변형률 간의 관계 및 하중을 변수화하여 측정한 변형률을 통해 이 변수들을 찾아내기 위해 유전자 알고리즘을 적용한다. GA는 자연선택과 진화와 같은 진화론에 근거한 휴리스틱 (heuristic) 기반의 전역적 해 탐색 기법으로 다양한 공학분야에서 널리 활용되고 있다. GA의 자세한 이론적인 내용은 De Jong의 연구 등 (De Jong, 1975; Goldberg, 1989)을 참고할 수 있다. 최적화 문제에서는 설정된 목적 함수를 최소화시키기 위한 기법으로써 GA가 적용되고, 본 연구와 같은 구조물의 시스템 식별 연구에서는 측정 데이터와 변수에 의해 결정되는 추정 데이터 간의 오차 함수를 최소화시키기 위한 기법으로써 GA가 적용되어 왔다. 앞서 언급한 Deng and Cai (2010)의 교량 구조물의 시스템 식별 연구에서 응답과 추정함수간의 오차를 최소화하기 위해 GA를 적용하였다. Jung and Kim (2011)는 소형 교량의 시스템 식별을 위해 Nelder-Mead's 'simplex' algorithm과 GA로 구성된 Hybrid GA를 이용하여 측정 응답과 해석 간의 오차함수를 최소화하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서의 변수는 교량을 구성하는 부재의 각종 단면 정보와 접합 강성 등으로 설정되었다. Perera et al. (2014)은 구조물의 손상식별을 위해 휨 강성 등을 손상지수화하고 이를 변수로 설정하였다. 구조물의 측정 및 해석 응답에 대해 정적 응답과 동적 응답으로 구분하여 다수의 오차함수를 설정하였고, 이들을 최소화 하기 위해 다목적 유전자 알고리즘인 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)를 적용하였다. 본 연구는 구조물의 하중 식별을 위해 구조물의 하중과 변형률 간의 관계를 정의하고 GA를 이용하여 이를 규명한다. 하중과 변형률 간의 관계를 행렬로 나타내고 행렬의 구성 성분 및 하중을 변수화하여 변형률을 추정한다. 추정된 변형률과 측정한 변형률 간에 차이를 오차함수로 설정하여 이를 최소화시키기 위해 GA를 적용하여 변수인 행렬의 구성 성분 및 작용한 하중을 찾게 된다. 제안한 알고리즘은 상용 소프트웨어인 Matlab으로 코드화하였고, 알고리즘 내부에 삽입된 GA 또한 Matlab으로 작성된 코드를 사용하였다.

3. 변형률 기반 하중 식별 알고리즘

3.1 단위 변형률 행렬

본 연구가 제안하는 변형률 기반 하중 식별 알고리즘은 구조물에 작용하는 하중과 이에 따라 구조물에 발생하는 변형률 사이의 관계에 기초하며, 이 관계를 정의하기 위해 구조물에 단위 하중이 작용한 경우 발생하는 변형률을 구조 해석을 통해 구하게 된다. Fig. 1에서와 같이 구조물의 하중 재하 예상점 (j)에 단위 하중 (1.0)을 가한 경우 발생하는 구조물의 부재 내 모니터링의 대상이 되는 특정 위치 (i)에서의 변형률 값을 ϵ_{ij} 로 나타낼 수 있다.

단위 하중에 의한 변형률 ϵ_{ij} 는 구조 해석을 통해 계산되고, 단위 변형률 행렬, M_{ij}^U 의 i번째 행, j번째 열에 삽입된다. 단위 변형률 행렬은 다음과 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

for $i = 1$ to K and $j = 1$ to n ,

$$[M_{ij}^U] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \cdots & \epsilon_{1n} \\ \vdots & \epsilon_{ij} & \vdots \\ \epsilon_{K1} & \cdots & \epsilon_{Kn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, K 는 계측점을 포함한 부재 내 모니터링 대상이 되는 지점의 개수, n 은 하중 재하 예상점의 수를 의미한다. 단위 하중에 의해 발생하는 변형률을 이용하기 위해 본 연구는 구조물의 거동을 탄성 범위로 제한하고 있으며, 다음과 같은 사항을 가정하고 있다. 1) 변형률의 선형성, 2) 하중 중첩의 원리.

하중 재하가 예상되는 부분에 하중이 재하되고 그 값이 증가함에 따라 구조물의 특정 계측점에서의 변형률은 하중 증가에 따라 선형으로 증가한다는 내용이 첫번째 가정사항에

Fig. 1 A Strain by a unit load

해당한다. 또한, 다수의 하중 재하가 이루어지는 경우, 각 하중 재하에 대한 특정 계측점에서의 변형률 변화의 합은 다수의 하중을 동시에 재하한 경우 발생하는 해당 계측 지점에서의 변형률 값과 같다는 것이 하중 중첩의 원리에 대한 내용이다.

하중 재하 예상점에 하중이 작용할 경우 위 단위 변형률 행렬과 하중 사이의 선형성에 의해 변형률 계측점에서의 하중 재하에 의한 변형률은 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

for $i = 1$ to K and $j = 1$ to n ,

$$\{M_i^R\} = [M_{ij}^U] \{F_j^R\} \quad (2)$$

여기서, $\{F_j^R\}$ 는 하중 재하 예상점, j에 재하되는 실제 하중을 의미하며, $\{M_i^R\}$ 는 $\{F_j^R\}$ 로 인해 구조물의 부재 내 특정 위치 i에서 발생하는 변형률을 의미한다.

3.2 변수 (Parameter) 설정

일반적인 구조 해석상의 모델링은 구조물 자체의 정보와 구조물이 처한 환경에 대한 합리적인 가정을 통해 이루어진다. 그러나 하중의 불확실성, 구조 부재의 단면 정보 및 재료 물성치의 불확실성, 시공 오차 등을 반영하여 실제의 구조물과 구조물의 환경을 정확히 모델링하는 것은 매우 어려운 일이다. 이론적으로는 설명하기 힘든 변수들이 현실 속 구조물에 작용하고 있으며, 이는 구조물의 응답으로 표출된다. 기존의 시스템 식별 연구들은 이러한 불확실성을 구조 해석 (FE 모델)에 반영하기 위해 여러 불확실 요소를 변수로 선정하고 이를 계측 데이터를 통해 찾았다. 하중의 크기, 부재의 휨/축/비틀림 등의 강성, 지점 및 접합부의 강성, 재료의 물성치, 단면의 손상에 따른 유효 단면 등을 그 변수로 설정하여 보다 정확한 해석 모델을 구현해 왔다.

한편, 구조물에 단위 하중을 가하여 구조 해석을 통해 얻은 단위 변형률 행렬 (식 (1))은 위에서 언급한 전역적 혹은 국부적인 구조물의 강성을 반영하여 얻은 값이다. 즉, 구조물에 가해지는 하중에 대한 구조물의 응답 메커니즘을 나타내는 행렬이라고 할 수 있다. 본 연구는 특정 강성 요소를 변수화하지 않고 구조물에 크고 작은 영향을 미치는 강성 관련 요소들의 조합이라 할 수 있는 단위 변형률 행렬을 변수로써 고려하였고, 이와 더불어 구조물 외부 환경적 불확실성이라 할 수 있는 하중을 또 다른 변수로 설정하였다.

구조물의 강성에 영향을 미치는 불확실 요소로 인해 단위

변형률 행렬의 구성 성분인 단위 하중에 의해 발생하는 변형률에 변화가 생긴다는 가정 하에, 다음 식 (3)과 같이 단위 하중에 의한 변형률을 정의하였다.

$$\text{for } i = 1 \text{ to } K \text{ and } j = 1 \text{ to } n, \\ \epsilon_{ij}^v = \epsilon_{ij} + X_{ij}^\epsilon \quad (3)$$

여기서, ϵ_{ij} 와 X_{ij}^ϵ 는 구조물의 하중 재하 예상점 (j)에 단위 하중 (1.0)을 가한 경우 발생하는 구조물의 부재 내 특정 위치 (i)에서 구조 해석을 통해 계산된 변형률 및 구조물 강성의 불확실성에 기인한 해당 변형률의 변화량을 각각 나타낸다. 변형률 변화량 즉, 변수 X_{ij}^ϵ 에 의해 변수화된 단위 하중에 의한 변형률 ϵ_{ij}^v 에 의해 단위 변형률 행렬은 다음 식 (4)와 같이 구성된다.

$$\text{for } i = 1 \text{ to } K \text{ and } j = 1 \text{ to } n, \\ [M_{ij}^{U^v}] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^v & \cdots & \epsilon_{1n}^v \\ \vdots & \epsilon_{ij}^v & \vdots \\ \epsilon_{K1}^v & \cdots & \epsilon_{Kn}^v \end{bmatrix} \quad (4)$$

단위 변형률 행렬 이외에 구조물의 환경적 불확실성, 즉 하중의 불확실성을 반영하기 위해 작용하는 하중 또한 변수로 설정하였고 식 (5)와 같다.

$$\text{for } i = 1 \text{ to } K \text{ and } j = 1 \text{ to } n, \\ \{F_j^{R^v}\} = \begin{bmatrix} X_F^1 \\ \vdots \\ X_F^j \\ \vdots \\ X_F^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.3 오차 함수

식 (2)는 변수 도입으로 식 (4)-(5)에 의해 다음 식 (6)과 같이 변화하게 된다.

$$\text{for } i = 1 \text{ to } K \text{ and } j = 1 \text{ to } n, \\ \{M_i^{R^v}\} = [M_{ij}^{U^v}] \{F_j^{R^v}\} \quad (6)$$

식 (6)은 변수들로부터 추정된 변형률을 나타낸다. 부재 내 모니터링의 대상이 되는 지점 중, 계측이 이루어진 부분

의 추정 변형률과 계측 변형률 간의 차이로부터 오차 함수를 설정하게 된다. 따라서, 계측이 이루어진 부분에 대해 단위 변형률 행렬 및 추정 변형률 벡터를 축소해야 하고, 이를 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{for } i = 1 \text{ to } k \text{ and } j = 1 \text{ to } n, \\ \{m_i^{R^v}\} = [m_{ij}^{U^v}] \{F_j^{R^v}\} \quad (7)$$

여기서, k ($k \leq K$)는 계측점의 개수를 나타내며, $m_{ij}^{U^v}$ 는 계측점에 대하여 전체 단위 변형률 행렬, $M_{ij}^{U^v}$ 를 축소시킨 단위 변형률 행렬이고, $m_j^{R^v}$ 는 계측점에서의 추정 변형률을 나타낸다. 각 계측점 i에서의 계측 변형률 m_i^T 를 통해 다음 식 (8)과 같은 오차 함수를 설정할 수 있다.

$$\text{for } i = 1 \text{ to } k \text{ and } j = 1 \text{ to } n, \\ E = |\{m_i^{R^v}\} - \{m_i^T\}| \\ = \sum_{i=1}^k \left(\sum_{j=1}^n ([m_{ij}^{U^v}] \{F_j^{R^v}\} - \{m_i^T\}) \right)^2 \quad (8)$$

위와 같이 오차 함수를 설정함으로써 추정된 데이터와 계측한 데이터 간의 오차를 최소화 시키는 최소화 문제로 변환시킬 수 있으며, 기존 시스템 식별 연구와 같이 최적화 알고리즘을 도입하여 변수를 찾아나가게 된다. 본 연구에서는 식 (8)을 최소화시키기 위해 GA를 적용하며, 변수인 단위 변형률 행렬의 구성 성분 변화량과 하중의 값을 찾아 나간다.

3.4 추정된 단위 변형률 행렬의 활용

3.3절의 오차 함수를 최소화 시키는 변수의 값 즉, 단위 변형률 행렬 ($M_{ij}^{U^v}$)과 작용한 하중 ($F_j^{R^v}$)의 값을 찾게 되면 식 (6)을 통해 계측하지 않은 부분에서의 변형률 또한 추정할 수 있다. 만약 구조물의 강성 변화 없이 하중의 위치 혹은 크기가 변화하는 경우, 추정된 단위 변형률 행렬 ($M_{ij}^{U^v}$)을 통해 변화한 하중 상황에 대해서도 계측한 변형률 데이터만으로 하중을 추정할 수 있다. 하중이 변하더라도 구조물 강성을 대변하는 추정된 단위 변형률 행렬값은 변하지 않기 때문이다. 따라서, 식 (7)에서 $m_j^{R^v}$ 대신 하중 변화 후 계측 데이터인 m_i^T 를 대입하고, 식 (7)을 다음 식 (9)와 같이 변

형시켜 주면 변화한 하중, $F_j^{R'}$ 를 추정할 수 있게 된다.

for $i = 1$ to k and $j = 1$ to n ,

$$\{F_j^{R'}\} = [m_{ij}^{U'}]^{-1} \{m_i^{T'}\} \quad (9)$$

마찬가지로, 식별한 하중을 전체 단위 변형률 행렬에 적용하면 다음 식 (10)과 같이 계측하지 않은 모니터링 대상의 지점에 대해서도 변형률을 추정할 수 있다.

for $i = 1$ to K and $j = 1$ to n ,

$$\{M_i^{R'}\} = [M_{ij}^{U'}] \{F_j^{R'}\} \quad (10)$$

여기서, $M_i^{R'}$ 는 하중 변화 후, 모니터링 대상이 되는 모든 지점에서의 추정 변형률 값을 의미한다. 이상에서 설명한 하중 식별 과정을 Fig. 2에 나타내었다.

4. 실험

이상에서 제안한 변형률 기반 하중 식별 알고리즘을 검증

하기 위해 3차원 철골 골조를 대상으로 중력 방향 하중을 정적 가력하는 실험을 수행하였다.

4.1 실험 개요

실험체는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 5층 1경간의 3차원 철골 골조 구조물로 강재는 SS400를 사용하였다. 기둥 (width: 30, depth: 30mm)과 거더 (width: 15mm, depth: 20mm)는 각각 동일한 단면을 사용하였다. 하중은 실험을 위해 제작된 강재 모듈을 이용하여 재하하였다. 모듈 하나의 무게는 58.96N (6.01kg)으로 층별 거더에 얹혀진 슬라브 위에 내려 놓게 되며 슬라브 상세 사항은 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 슬라브 하단에 보를 부착하여 슬라브와 슬라브에 얹혀지는 모듈이 슬라브 하단의 보를 통해 집중 하중의 형태로 거더에 전달되도록 하중 재하를 고려하였다. 하중은 5개층 중 3개층 (1/3/5층)에 재하하였고, 하중 단계를 총 3단계로 나누어 단계별로 모듈의 수를 늘려가는 방법으로 실험을 수행하였다. 자세한 하중 정보는 Table 1에 정리하였고, 하중 재하 전과 후의 실험 전경은 각각 Photo 1과 같다.

Fig. 2 Flow chart for the proposed algorithm

Fig. 3 Dimension of steel frame specimen

Fig. 4 The slab detail

Table 1 Loading step

Loading step	Step1	Step2	Step3
Number of modules on a floor (ea)	40	50	60
Weight on a floor (N)	2358.3	2947.9	3537.5
Total number of modules (ea)	120	150	180
Total weight (N)	7075.0	8843.7	10612.5

(a) Initial step of loading (b) Loading step 3

Photo 1 The Whole view of experiment test

변형률 계측은 전기저항식 센서 (electric strain gauge, ESG)를 이용하였고, 3개층 (1/3/5층)에 각 층별 10개씩, 총 30개의 센서를 해당층 거더의 상부 플랜지에 설치하여 하중 단계별로 실험체의 변형률을 계측하였다. ESG 설치 현황은 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 센서 표기에서 FL은 센서가 설치된 층을 나타낸다. 각 층 별 센서 번호는 Table 2에 정리하였으며, 하중 단계 2와 3에서 미계측하였다고 가정하여 하중 식별 알고리즘에 적용되지 않은 센서는 센서 번호 옆에

Fig. 5 Sensor location on a floor

Table 2 Sensor numbering

Sensor No.	1 st Floor	3 rd Floor	5 th Floor
FL-1	1-1	3-1	5-1
FL-2	1-2	3-2	5-2
FL-3	1-3(■)	3-3	5-3
FL-4	1-4	3-4(■)	5-4(■)
FL-5	1-5	3-5	5-5
FL-6	1-6	3-6	5-6
FL-7	1-7	3-7	5-7(■)
FL-8	1-8(■)	3-8(■)	5-8
FL-9	1-9	3-9	5-9
FL-10	1-10	3-10	5-10

표시 (■)하였고 이 부분의 변형률은 이후 식별된 변수를 통해 추정된다.

4.2 실험 결과

먼저, 하중 단계 1의 계측한 모든 변형률 데이터를 하중 식별 알고리즘에 적용하여 단위 변형률 행렬 및 하중 단계 1에서의 하중을 식별하였다. 이렇게 구한 단위 변형률 행렬을 통해 3.4절의 식 (9)를 이용하여 하중 단계 2와 3에서의 작용 하중 값을 추정하였다. 하중 단계 2와 3에서 하중을 추정할 때에는 일부 계측 데이터 (최대 변형률 발생 예상 지점)를 제외 (층당 2지점)한 변형률 계측값을 식 (9)에 적용하였다. 이상의 각 단계별 하중 추정 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, Table 3에서 알 수 있듯이 비교적 정확히 작용 하중의 크기를 식별하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구가 제안하는 알고리즘을 이용하여 식별한 하중 및 단위 변형률 행렬을 이용하여 구조물의 모니터링 대상이지만 계측되지 않은 부분의 변형률을 추정할 수 있다. 식 (10)을 이용하여 하중 단계 2와 3의 하중 식별 시 제외시켰던 미계측되었다고 가정한 변형률을 추정해 보았다. 해당 지점은

Fig. 6 The results of load identification

Table 3 The errors of load identification results

Loading step	Step1	Step2	Step3
Actual load (N)	7075.0	8843.7	10612.5
Estimated load (N)	7073.4	8816.6	10585.8
Error (%)	0.02	0.31	0.25

최대변형률 발생 예상점으로 선정하였다. 추정한 변형률 지점은 층당 2지점, 총 6지점으로 각 지점의 위치 및 해당 지점에서의 추정 변형률과 계측 변형률을 Fig. 7에 나타내었다. 또한, 추정한 변형률 (Estimated Strain)과 해당 지점에서의 계측 변형률 (Reference Strain)간의 오차를 Table 4에 정리하였다.

Table 4에서 확인할 수 있듯이 계측한 변형률과 비교하여 0.17~3.13%의 상당히 작은 오차 범위 안에서 변형률을 추정할 수 있었다. 위 결과로부터 하중 단계 1에서, 계측한 변형률을 통해 구조물의 강성을 대변하는 단위 변형률 행렬을 비교적 정확히 식별하였음을 알 수 있었다. 하중 크기가 변화여도 정확한 하중 식별이 가능하며, 변화된 하중의 식별과 이전 하중 단계에서 식별해 놓은 단위 변형률 행렬을 통해 하중 조건이 변한 구조물 내에 계측하지 않은 응답 (변형률) 또한 추정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 7 Strain (unmeasured strain) estimation results on loading step 2 and 3

Table 4 The results of the strain estimation

Sensor No.	Loading step 2			Loading step 3		
	Reference Strain	Estimated Strain	Error (%)	Reference Strain	Estimated Strain	Error (%)
1-3	-216.7	-213.7	1.31	-259.2	-255.6	1.37
1-8	-218.0	-214.5	1.62	-259.0	-253.5	2.12
3-4	184.0	179.2	2.59	221.0	214.8	2.80
3-8	-170.8	-173.3	1.48	-207.0	-213.5	3.13
5-4	210.3	209.9	0.17	253.8	253.2	0.21
5-7	210.0	211.2	0.57	250.8	250.4	0.17

5. 결 론

본 연구에서는 철골 골조 구조물의 안전성 모니터링을 위한 변형률 기반 하중 식별 알고리즘을 제안하였다. 본 연구에서 제시한 알고리즘은 하중과 변형률 사이의 관계를 단위 변형률 행렬로 정의하고, 단위 변형률 행렬의 변화량과 작용한 하중을 변수로 설정하였다. 변수인 단위 변형률 행렬과 하중을 통해 추정된 변형률과 계측한 변형률의 차이를 최소화하는 오차 함수를 설정하며, 유전자 알고리즘을 이용하여 변수를 찾게 된다. 제안한 알고리즘은 3차원 철골 골조 구조물의 정적 가력 실험을 통해 검증해 보았다.

- (1) 3차원 철골 골조 구조물의 정적 가력 실험 결과, 계측한 변형률을 통해 작용한 하중을 정확히 식별해낼 수 있었다. 추정된 변형률과 계측한 변형률의 오차 함수를 최소화하며, 변수로 설정한 단위 변형률 행렬 및 작용한 하중을 식별할 수 있었다.
- (2) 하중을 증가 (하중 단계 2와 3)시켜 구조물의 하중 조건에 변화를 준 상태에서 변형률을 계측하였고, 최초 식별한 단위 변형률 행렬에 계측 변형률만을 적용하여 변화한 하중의 크기를 추정할 수 있었다. 이 또한 상당히 작은 오차 범위 내에서 변화한 하중을 추정할 수 있었다.
- (3) 하중이 변화한 경우 (하중 단계 2와 3), 식별한 단위 변형률 행렬 및 작용한 하중을 이용하여 모니터링 대상이지만 계측하지 않은 지점에서의 변형률을 추정해 보았다. 최대 3.13%의 오차를 보이며 비교적 정확하게 미계측 지점에서의 변형률을 추정할 수 있었다.

본 연구에서는 계측한 변형률을 이용해 시공 중 또는 시공 후 구조물의 불확실하고 변동성 있는 하중을 식별하는 방법을 제안하였다. 작용한 하중뿐만 아니라 하중 변화 시 모니

터링 대상이 되는 부재의 미계측 지점에서의 변형률 추정을 가능하게 함으로써 더욱 현실적이고 효과적인 철골 구조물의 안전성 모니터링이 가능할 것으로 기대한다. 향후 안전성 모니터링으로 국한된 본 연구를 확장하여 계측과 식별을 통해 구조물의 변형을 추정하는 연구에 수행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 첨단도시개발사업의 연구비 지원 (과제번호 #09 첨단도시 A01))에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. AISC (2005), Steel Construction Manual, American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, IL.
2. Cho, N. S., Kim, N. S. (2008), Prediction of the Static Deflection Profiles on Suspension Bridge by Using FBG Strain Sensors, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(5A), 699-707 (in Korean).
3. Choi, S. W., Lee, J., Oh, B. H., and Park, H. S. (2013), Measurement model for the maximum strain in beam structures using multiplexed fiber bragg grating sensors, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Article ID 894780, 9.
4. Choi, S. W., Lee, J., Oh, B. K., Park, H. S. (2013), Analytical models for estimation of the maximum strain of beam structures based on optical fiber bragg grating sensors, *Journal of Civil Engineering and Management*, 29(9), 707-717.
5. De Jong K. A. (1975), An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems, Doctoral Dissertation, University of Michigan.
6. Goldberg D. E. (1989), Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Westley.
7. Hahn, H. G., Ahn, H. J. (2012), A Study on Development of Structural Health Monitoring System for Steel Beams Using Strain Gauges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(1), 99-109 (in Korean).

8. Hampshire, T. A., Adeli, H. (2000), Monitoring the behavior of steel structures using distributed optical fiber sensor, *Journal of Constructional Steel Research*, 53(3), 267-281.
9. Hong, K., Lee, J., Choi, S. W., Kim, Y., Park, H. S. (2013), A strain-based load identification model for beams in building structures, *Sensors*, 13(8), 9909-9920.
10. Jung, D. S., and Kim, C. Y. (2011), Finite element model updating on small-scale bridge model using the hybrid genetic algorithm, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(6), 481-495.
11. Lee, H. M., Park, H. S. (2013), Measurement of maximum strain of steel beam structures based on average strains from vibrating wire strain gages, *Experimental Techniques*, 37(2), 23-29.
12. Lee, J. H., Choi, S. W., Park, H. S. (2013), A Regression-based Estimation of Strain Distribution for Safety Monitoring of the Steel Girder Subjected to Uncertain Loads, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(2), 10-20 (in Korean).
13. Li, S., Wu, Z., Zhou, L. (2010), Health monitoring of flexural steel structures based on distributed fibre optic sensors, *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(3), 303-315.
14. Lioe, R., Wong, W. (2012), The Sands Hotel and Sands SkyPark, *The Arup Journal*, Issue 1, 17-20.
15. Lozano-Galant, J. A. (2013), Application of observability techniques to structural system identification, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(6), 434-450.
16. Lu, D., Cai, C. S. (2010), Bridge model updating using response surface method and genetic algorithm, *Journal of bridge engineering*, 15(5), 553-564.
17. Oh, B. K., Lee, J. H., Choi, S. W., Park, H. S., Kim, Y. (2014), A Estimation Method of Strain Distribution for Safety Monitoring of Multi-span Steel Beam Using FBG Sensor, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(1), 138-149 (in Korean).
18. Park, H. S., Jung, H. S., Kwon, Y. H., Seo, J. H. (2006), Analytical models for assessment of the safety of steel beams based on average strains from long gage optic sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 125, 109-113.
19. Park, H. S., Jung, S. M., Lee, H. M., Kwon, Y. H., Seo, J. H. (2007), Analytical models for assessment of the safety of multi-span steel beams based on average strains from long gage optic sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 137(1), 6-12.
20. Park, H. S., Shin, Y., Choi, S. W., and Kim, Y. (2013), An Integrated Structural Health Monitoring System for the Local/Global Response of a Large-Scale Irregular Building under Construction, *Sensors*, 13, 9085-9103.
21. Sanayei, M., Imbaro, G. R., McClain, J. A. S., Brown, L. C. (1997), Structural model updating using experimental static measurements, *Journal of structural engineering*, 123(6), 792-798.
22. Sanayei, M., Phelps, J. E., Sipple, J. D., Bell, E. S., Brenner, B. R. (2012), Instrumentation, nondestructive testing and finite-element model updating for bridge evaluation using strain measurements, *Journal of bridge engineering*, 17(1), 130-138.
23. Sanayei, M., Rohela, P. (2014), Automated finite element model updating of full-scale structures with PARAmeter identification system(PARIS), *Advances in Engineering Software*, 67, 99-110.
24. Tam, H., Au, H. Y., Chung, K. M., Liao, W. Y., Chung, W. H., Liu, S. Y., Lai, S. Y., Lai, C. C., Ni, Y. Q., Csipkes, A. (2011), Distribution Optical Sensor System on the 610-m Guangzhou New TV Tower, *Optical Fiber Communication Conference*, Los Angeles.

Received : 01/03/2014

Revised : 01/23/2014

Accepted : 01/27/2014

요 지

본 연구에서는 철골 골조 구조물의 안전성 모니터링을 위하여 계측한 변형률을 통해 구조물에 작용한 하중을 식별하는 알고리즘을 제안한다. 기존의 시스템 식별 연구에서 구조물의 강성 등을 변수화한 것과는 다르게, 본 연구에서는 구조물에 작용한 하중과 이로 인해 구조물에 발생하는 변형률 간의 관계를 행렬로 정의하고, 이 행렬 및 작용한 하중을 변수화 한다. 계측한 변형률과 변수를 통해 추정한 변형률 사이의 차이를 오차함수로 설정하고 이를 최소화시키기 위해 최적화 알고리즘 중 하나인 유전자 알고리즘을 적용한다. 구해진 변수와 계측 변형률을 통해 작용한 하중을 식별하고 구조물의 하중 변화 시 미계측 지점의 응답을 추정한다. 본 연구에서 제안하는 하중 식별 알고리즘을 검증하기 위해 3차원 철골 골조 구조물의 정적 가력 실험을 수행하였고, 계측한 변형률을 통해 가해진 하중을 낮은 오차 수준으로 식별할 수 있었다. 또한, 하중 조건 변화 시, 계측한 변형률을 통해 모니터링 대상이 되는 미계측 지점의 변형률을 0.17~3.13%의 오차 범위로 추정하였다. 본 연구가 제안하는 식별법이 철골 구조물의 보다 현실적인 안전성 모니터링에 효과적으로 적용될 것으로 기대된다.

핵심 용어 : 구조 건전도 모니터링, 시스템 식별, 변형률 추정, 철골 구조물