구간선형보간법을 이용한 철근콘크리트 아웃리거 벽체 개구부의 최적설계

이 혜 림¹·김 한 수^{2†}

¹건국대학교 대학원 건축학과 석사과정, ²건국대학교 건축학부 교수

Optimum Design of Reinforced Concrete Outrigger Wall Opening Using Piecewise Linear Interpolation

Hye-Lym Lee¹ and Han-Soo Kim^{2†}

¹Graduate Student, Department of Architecture, Konkuk Univ., Seoul, 05029, Korea

²Professor, Division of Architecture, Konkuk Univ., Seoul, 05029, Korea

Abstract

In this study, a framework for optimizing the opening in an outrigger wall is proposed. To solve a constrained bounded optimization problem, an in-house finite element program and SQP algorithm in Python SciPy library are utilized. The openings of the outrigger wall are located according to the strut-tie behavior of the outrigger wall deep beam. A linear interpolation method is used to obtain differentiable continuous functions required for optimization, whereas a database is used for the efficiency of the optimization program. By comparing the result of the two-variable optimization through the moving path of the search algorithm, it is confirmed that the algorithm efficiently determines the optimized result. When the size of each opening is set to individual variables rather than the same width of all openings, the value of the objective function is minimized to obtain better optimization results. It was confirmed that the optimization time can be effectively reduced when using the database in the optimization process.

Keywords : tall building, outrigger, web opening, optimum design, sequential quadratic programming

1. 서 론

초고층 건물의 설계에 있어 구조물의 안전성과 사용성을 확보하기 위해 횡변위를 저감하는 구조 시스템의 적용이 필요하다. 초고층 건물의 코어 전단벽과 외주부 기둥을 이어 아웃리거는 건물의 일체성을 확보하여 건물의 최대 횡변위를 줄이고 코어 전단벽의 전도모멘트를 저감시키는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 최근 수십년간 진행되어 왔던 아웃리거 관련 연구는 주로 아웃리거의 구조적 효과와 최적의 설치 위치를 찾아내는 것에 집중되어 있다. 그 중 대부분의 연구는 단순화된 모델에 대한 수식해를 정립하여 아웃리거의 최적 위치를 찾아내는 것에 관심을 가져왔다. Taranath(1975)는 아웃리거를 강제로 보고 하나의 아웃리거가 사용될 경우 그 최적위치는 상부로

부터 전체 높이의 0.455임을 밝혔다. Smith와 Salim(1981)은 아웃리거의 강성을 고려할 경우의 아웃리거의 최적위치를 수식해를 통해 구했다. Hoenderkamp 등(2003)은 Smith와 Salim(1981)이 제시한 수식을 아웃리거의 전단 강성을 반영할 수 있도록 변경하여 아웃리거의 최적위치를 구해냈다.

아웃리거는 일반적으로 철골 트러스 형태로 설계되어 왔으나 최근에는 깊은 보 형태인 철근콘크리트 아웃리거 벽체로 설계하는 사례가 늘고 있다(Wang, 2017). 아웃리거 벽체는 철근콘크리트 전단벽의 큰 강성으로 횡변위를 줄이는데 보다 효과적이지만 중량이 무겁고, 평면상 이동경로를 차단한다는 단점이 있다(Goman, 2016). 따라서 공간을 보다 효율적으로 활용하기 위하여 아웃리거 벽체에 개구부를 설치하는 것이 필요하다.

스트럿-타이 모델을 적용하면 아웃리거 벽체와 같은 깊은 보

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-2049-6110; E-mail: hskim@konkuk.ac.kr

Received January 28 2020; Revised April 27 2020;

Accepted April 28 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

는 수직하중이 가해질 경우 가력점과 지지점을 연결하는 스트럿과 타이틀을 통하여 힘이 전달된다. 이러한 깊은 보에 개구부를 두는 경우 보 내부의 힘전달 경로를 변화시켜 깊은 보의 전단 내력이 저하되고 전단거동의 양상이 달라질 수 있다. 특히 깊은 보의 전단에 의해 역학적 거동이 좌우되기 때문에 개구부가 하중 경로를 차단하면 전단 내력이 현저히 저하될 수 있다. 이러한 역학적 거동을 파악하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며 그 중 대부분의 연구는 깊은 보의 전단강도를 실험과 비선형해석을 통해 파악하고 개구부의 크기 및 형태가 전단 강도에 미치는 영향을 확인하였다(Smith and Vantisotis, 1982; Tan *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2006; Tseng *et al.*, 2017). 하지만 지금까지 사용자의 통행을 위한 사각형 형태의 개구부가 설치된 경우 아웃리저의 강성 및 강도 저하에 대한 영향은 정량적으로 많은 연구가 되어 있지 않다. Kim 등(2019)은 아웃리저 벽체에 위치한 여러 개의 개구부가 아웃리저 벽체의 강성과 강도에 미치는 영향을 선형, 비선형 해석을 통해 확인하였다. 이와 같이 비선형 해석을 통해 실제 구조물의 응력 상태 및 변위를 확인하는 것도 중요하지만 비선형 해석은 해석에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다.

그러므로 초기 설계 단계에서는 선형 해석을 통해 최적화된 개구부의 크기를 확인한 이후 최적화된 개구부 크기를 가지는 해석 모델에 대해 비선형 해석을 진행하여 구조물의 강도와 응력 분포를 확인하고 보강설계 하는 것이 실용적인 대안이라고 볼 수 있다. 한편, 아웃리저 벽체에 여러 개의 개구부를 설치할 경우 강성 저하를 최소화하는 개구부의 폭을 찾기 위해서는 각 개구부의 폭을 변화시키며 그 영향을 평가하여야 한다. 하지만, 개구부의 수가 증가할수록 영향 평가에 소요되는 시간은 매우 증가한다. 따라서 강성 저하를 최소화하는 최대한의 개구부 크기를 얻어낼 수 있는 효율적인 최적화 기법의 적용이 필요하다.

본 논문에서는 아웃리저 벽체의 초기 설계에 도움이 될 수 있도록 아웃리저 벽체의 소요 강성을 확보하는 동시에 개구부의 폭을 최대화하는 최적 설계를 방법을 제시하고자 한다. 그리고 최적화 결과로 도출된 개구부의 크기를 선형 유한요소 해석을 통해 그 영향을 확인한다.

2. 아웃리저 벽체 개구부 설계문제

이 장에서는 개구부가 설치되는 대상 구조물 모형을 소개하고 최적의 개구부 크기 설계를 위한 최적화 문제의 설계 목적 함수 및 설계변수를 정의한다.

2.1 아웃리저 벽체 모형

Kim 등(2019)의 연구에서 사용하였던 해석 모델을 사용하

여 전용 유한요소해석 프로그램을 사용하여 해석을 수행한다. Fig. 1과 같이 중앙에 코어가 배치된 대칭형 건물 평면을 가지고 있는 80층 골조를 예시로 분석한다. 해당 모형에서 아웃리저 벽체는 3층에 걸쳐 대칭으로 설치된다.

해석 시간을 단축시키기 위해서 대칭 단면의 일부인 아웃리저 벽체의 절반을 Fig. 2와 같이 단순하게 모델링하였다. 개별 요소의 크기는 국부적인 거동을 모사하기 위해서 0.1m의 정사각형으로 하였다. 깊은 보의 경우에는 전단 거동이 주를 이루므로 절점 당 2개의 자유도를 가지는 평면 응력 요소를 사용하여 모델링하였다. 전단벽의 상하단과 좌측의 요소 절점은 고정단으로 모델링하였다.

전단벽과 아웃리저 및 기둥의 특성값은 Table 1과 같다. 한층의 높이는 3.5m이고, 아웃리저 벽체를 모델링할 경우 3개의 층에 더하여 아웃리저 벽체 상부의 0.2m 슬래브와 하부의 보 0.6m의 깊이를 포함하여 총 11.3m의 깊이를 가지는 벽체로 모델링하였다. 콘크리트와 철근의 탄성계수는 23GPa, 210GPa로 설정하였으며 포아송비는 0.25를 사용하였다.

초고층 건물의 아웃리저에는 중력하중과 횡하중에 의해 발

Fig. 1 Analysis model

Fig. 2 Simplified analysis model

Table 1 Properties of simplified analysis model

Member	f_{ck} (MPa)	Length (m)	Thickness (m)	Height (m)
Shear wall	38.0	7.5	1.0	17.5
Outrigger		13.5	0.8	11.3
Column		1.0	1.0	11.3

Fig. 3 Strut-Tie model of outrigger wall by lateral load

Fig. 4 Reduction ratio of lateral displacement and shear force of outrigger with varying location

생하는 기둥의 축력이 벽체의 전단력으로 작용하며 벽체 내부에 압축력과 인장력을 전달하는 하중경로가 Fig. 3과 같이 형성된다. 하중 경로는 크게 스트럿과 타이로 단순화할 수 있는데, 스트럿은 압축력이 전달되는 경로이고 타이는 인장력이 전달되는 경로이다. 횡하중의 방향이 변경될 경우 Fig. 3의 스트럿과 타이는 뒤바뀔 수 있다.

전체 80층의 골조에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과 Fig. 4와 같이 아웃리거가 47층에 위치한 경우 가장 우수한 성능을 보임을 확인하였다(Kim *et al.*, 2019). 또한, 이 때 아웃리거 벽체에 가해지는 횡하중으로 인한 전단력은 약 15000kN임을 확인하였다. 이와 동시에 시공단계해석을 수행하여 시간 의존적 거동을 포함하였을 때 아웃리거에 중력하중으로 인하여 약 8000kN의 전단력이 작용함을 확인하였다. 따라서 아웃리거가 최적 위치인 47층에 위치할 경우 아웃리거에는 총 23000kN의 전단력이 작용한다고 가정하여 해석 모델의 기둥에 수직적으로 분산시켜 가력하였다.

2.2 설계변수 설정

아웃리거 벽체 개구부 최적설계 문제는 앞서 구조물 및 개구부를 표현할 수 있는 설계변수 및 목적 함수를 정의하고, 해당 목적함수를 최소화하는 설계변수를 찾는 최적화 문제로 나

Fig. 5 Geometry and design variables of simplified analysis model

타낼 수 있다. Fig. 2와 같이 아웃리거 벽체에서는 하중에 의하여 스트럿 및 타이의 하중경로가 형성된다. 이에 따라 아웃리거 벽체의 구조적인 거동에 개구부가 미치는 영향을 최소화하기 위해서는 Fig. 5와 같이 스트럿과 타이의 단면적을 결손시키지 않도록 개구부를 배치하는 것이 합리적인 대안이라 볼 수 있다.

2.3 목적함수 및 제약함수

앞서 설명된 바와 같이 유한요소해석모델의 요소 크기를 0.1m 단위로 설정하였으므로 개구부의 폭을 입력할 시에는 몇 개의 메쉬를 삭제할 것인지 정수 단위로 입력하여야 한다. 따라서, 이 연구에서는 단순히 목적함수를 개구부의 폭의 합에 음의 부호를 더한 다음 식 (1)과 같이 구성하였다.

$$f(\mathbf{x}) = -\sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{x}$ 는 개구부의 폭인 설계변수 정수 벡터 $\langle x_1, x_2, x_3, x_4 \rangle^T$ 를 의미하고, n 은 개구부의 개수를 의미한다. 제약 함수는 아웃리거의 최대 수직 변위 값이 일정 값을 넘지 못하도록 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$g(\mathbf{x}) - \Delta_{allowable} \leq 0 \quad (2)$$

여기서, $g(\mathbf{x})$ 는 설계변수 벡터 $\mathbf{x}$ 를 대입하였을 경우의 기둥 중앙 최하단 절점 변위를 뜻하고, $\Delta_{allowable}$ 은 아웃리거의 허용 가능한 최대 변위를 의미한다.

2.4 설계문제 정의

위의 단계를 거쳐 아웃리거 벽체 개구부 최적화 설계문제는 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f(\mathbf{x}) &= -\sum_{i=1}^n x_i \\ \text{s.t. } g(\mathbf{x}) - \Delta_{\text{allowable}} &\leq 0 \\ x_{\min} &\leq x_i \leq x_{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $x_{\min}, x_{\max}$ 는 각각 설계변수의 최소, 최대 경계값을 의미한다. 해당 문제의 경우 아웃리거의 형상에 의해 개구부의 폭의 최소값은 0, 최대값은 6.7m에 해당하는 67로 설정하였다.

3. 순차이차계획법 기반 최적화 알고리즘

순차이차계획법(Sequential Quadratic Programming)은 변수에 대한 목적함수 값이 비선형적으로 변하는 비선형 문제에서 경사도(gradient) 기반의 함수를 풀어 최적화된 결과값을 도출하는 최적화 알고리즘이다. 해당 알고리즘은 목적 함수를 여러 개의 이차 함수로 근사하고 제약조건을 이차함수로 근사해서 Fig. 6과 같이 문제를 풀어 나간다. 해당 방법은 수렴속도가 빠르고 기존의 선형 탐색(Line search)보다 정확하게 최적화를 수행할 수 있다는 장점이 있으나, 목적함수 및 제약함수의 함수 분포가 오목해야 최적화 값을 올바르게 찾아낼 수 있다(Parkinson *et al.*, 2013).

본 연구에서는 전용 유한요소해석 프로그램을 통해 계산한 제약 함수값을 순차이차계획법을 통해 최적화하였다. 순차이차계획법을 구현하기 위해서 파이썬(Python)의 SciPy 라이브

러리 중 순차이차계획법을 구현한 알고리즘인 SLSQP를 사용하였다(Millman and Aivazis, 2011).

순차이차계획법을 적용하기 위해서는 경사도를 계산하여야 하며 설계변수는 실수를 사용하여야 한다. 하지만, 앞서 설명된 바와 같이 유한요소해석 시에는 요소를 아주 작게 하더라도 실수 단위로 요소를 추가하거나 제거할 수 없다. 유한요소해석을 이용한 경사도 기반의 최적화 방법을 적용하기 위해 본 연구에서는 실수인 설계변수를 주변의 정수로 변환하여 해석을 수행하고 보간을 통해 실수값에 해당하는 목적 함수 및 제약 함수 값을 계산하는 방법을 적용하였다.

본 연구에서 사용한 구간선형보간법은 Fig. 7과 같이 라그랑주 선형 보간법을 사용하여 실수 변수에 따른 제약 함수 값을 찾는다. 첫 번째로 식 (4)와 같이 실수 변수 x_i 를 올림한 정수 $\bar{x}_i$ 를 찾는다.

$$\bar{x}_i = \lceil x_i \rceil = \text{ceil}(x_i) \quad (4)$$

이후, $\bar{x}_i$ 와 $\bar{x}_i - 1$ 의 정수 변수값에 해당하는 유한요소해석을 해석 결과값을 이용하여 식 (5)와 같은 보간함수를 생성하여 원래의 실수 변수값에 해당하는 결과값을 얻는다. 식 (5)에 의해 보간된 함수는 미분 가능한 함수가 되어 경사도를 기반한 최적설계 알고리즘을 사용할 수 있다.

$$\bar{g}(x_i) = g(\bar{\mathbf{x}} - \hat{\mathbf{x}}_i)(\bar{x}_i - x_i) - g(\bar{\mathbf{x}})(\bar{x}_i - 1 - x_i) \quad (5)$$

여기서, $\hat{\mathbf{x}}_i$ 는 i 번째 방향의 단위 벡터를 의미한다. 예를 들어 $i=2$ 이고 $n=4$ 일 경우, $\hat{\mathbf{x}}_i = \langle 0, 1, 0, 0 \rangle^T$ 이다. 다변수가 사용될 경우 식 (6)과 같이 산술평균값으로 실수 변수 벡터가 입력될 경우의 제약 함수 값으로 계산한다.

$$\bar{g}(\mathbf{x}) = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \bar{g}(x_i) \quad (6)$$

Fig. 6 Flow chart of sequential quadratic programming

Fig. 7 Piecewise linear interpolation with two integer variables

따라서 실수 변수 벡터가 입력된 경우 다변수 경계 제약 최적화 문제를 식 (7)과 같이 다시 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f(\mathbf{x}) &= -\sum_{i=1}^n x_i \\ \text{s.t. } \bar{g}(\mathbf{x}) - \Delta_{\text{allowable}} &\leq 0 \\ x_{\min} &\leq \tilde{x}_i \leq x_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

위와 같이 보간함수를 설정할 경우 하나의 실수 벡터에 해당하는 제약 함수값을 구하기 위해서는 $n+1$ 회의 유한요소해석이 필요하다. 하지만 유한요소해석은 정수로 변환된 설계 변수에 대해서 수행하므로 동일한 정수 변수에 대해서는 해석을 다시 할 필요가 없고 이전의 해석 결과를 그대로 재활용할 수 있는 장점이 있다. 따라서, 정수로 변환된 설계변수와 유한요소해석결과를 데이터베이스로 저장한 후 나중에 동일 변수가 입력될 경우 유한요소해석을 수행하지 않고 데이터베이스 내의 값을 탐색하는 방법을 적용함으로써 해석시간을 대폭 단축시킬 수 있다.

앞에서 설명한 최적화 알고리즘을 순서도로 나타내면 Fig. 8과 같다.

Fig. 8 Flow chart of optimization algorithm

4. 전수조사 및 최적설계 결과

정수 변수를 사용한 유한요소해석 결과를 구간선형보간법을 이용하여 실수 변수를 사용한 제약 함수로 보간하고 순차이차계획법을 적용하여 제한 조건으로 주어진 강성을 가지면서도 최대의 개구부를 가질 수 있는 최적설계 방법을 개발하였다. 개발된 최적설계 방법의 검증을 위하여 1변수와 2변수 문제에 대한 전수 조사 결과와 최적 설계 결과를 비교하였다. 모든 개구부의 폭을 동일하도록 설정한 1변수 모델과 좌우측의 개구부 폭을 동일하게 하고 상하부의 개구부 폭을 동일하게 설정한 2변수 모델에 대하여 전수조사를 수행하였다.

Fig. 9는 1변수 모델의 전수 조사 결과를 나타내고 있다. 개구부의 면적이 전체 아웃리거 면적의 10%가 될 때 아웃리거의 강성은 약 20% 감소한다. 이후 아웃리거의 개구부 단면적이 27%가 될 때까지 감소의 경향은 유사하게 유지되나 27% 이상 이 될 때 급격히 강성이 감소하는 양상을 보인다. 이는 아웃리거의 개구부 크기가 4.5m 이상일 때 개구부가 수직선 상 겹쳐지는 부분이 생기며 스트럿의 강성이 급격히 약화된 것으로 추정할 수 있다. 또한, 겹쳐지는 개구부 중 상부 개구부와 하부 개구부 사이의 슬래브 및 보 요소가 국부적인 휨 변형을 하는 것 때문으로 판단된다.

Fig. 9 Exhaustive search with one variable

Fig. 10 Exhaustive search with two variables

Fig. 10은 2변수 전수 조사 결과 목적 함수와 제약 함수의 등고선을 보여 주고 있다. Fig. 10에서 나타난 바와 같이 우측 상단으로 갈수록 개구부의 폭의 합이 증가하기 때문에 반대 부호인 목적함수 값은 감소하며 최적 결과에 가까워지지만 제약 함수의 역수인 강성 값은 낮아지며 구조 부재의 성능이 낮아지는 양상을 보인다.

본 연구의 최적화는 일정한 강성을 확보하는 동시에 개구부의 크기를 최대화하는 것이므로 목적함수의 등고선도에서 목적함수가 같은 지점인 등고선 중 최우측에 있는 선과 제약함수의 등고선이 만나는 지점이 최적점으로 선택될 것이라는 것을 유추할 수 있다.

Fig. 11은 실제 최적화가 진행되는 과정에서의 탐색 알고리즘의 경로를 보여주고 있다. 이 최적화에서 정규화된 강성은 0.7 이상이 되도록 설정되었는데, 탐색 알고리즘이 (0.0,0.0) 지점에서 출발하여 정규화된 강성이 0.7인 등고선 범위 내에서 가장 최우측 상단에 있는 점이 최종 최적안으로 선택됨을 확인할 수 있다. 또한 기존에 설정된 최소 최대 범위의 개구부 폭 범위 안에서 제약조건을 만족시키되 개구부의 폭을 최대화하는 범위로 최적화가 진행되었다는 것을 알 수 있다. 이는 총 55회의 유한요소해석을 통해 이루어졌는데, 전수를 조사하는 경우인 총 1296회보다 96% 가량의 해석 횟수가 절감된 효율적인 방법임을 알 수 있다.

변수 개수를 변경해가며 최적화를 수행하며 Figs. 12~14와 같이 각 최적화 단계별로 목적함수와 제약조건 값을 출력하여 최적화 알고리즘의 유효성을 확인하였다. 해석 결과 변수의 개수가 늘어날수록 최적화에 걸리는 시간과 횟수는 증가하는 양상을 보였다. 또한, 최적화 알고리즘이 올바르게 작동하는 것을 확인하였다. Table 2은 최적화 결과로 결정된 변수와 해당하는 목적함수 및 제약조건을 나타내고 있다. 변수가 1개에서 4개로 늘어날 경우 가능한 개구부의 크기가 9% 향상됨을 확인할 수 있다. 또한, x_1, x_4, x_3, x_2 순으로 큰 결과값을 확인할

Fig. 11 Search path of algorithm with two variables

수 있다. Table 3는 변수 개수별 데이터 베이스의 유무에 따른 해석 횟수 및 시간을 보여주고 있다. 표에서 보여지는 바와 같이 데이터 베이스의 유무는 크게 82%까지 해석 시간을 단축시켜 효율적인 최적화를 가능하게 함을 알 수 있다.

Table 4는 Table 2에서 확인된 4변수 최적화 결과의 변수값의 평균값을 대입하여 해석한 결과값을 비교한 것이다. 평균값을 대입했으므로 두 경우 모두 목적함수 값은 같지만 최적화된 경우가 제약함수의 값에 있어 3% 적은 값을 도출했다.

Fig. 12 Objective function and constraint in iteration with one variable

Fig. 13 Objective function and constraint in iteration with two variables

Fig. 14 Objective function and constraint in iteration with four variables

Table 2 Result of optimization

# of variables	$x(m)$				objective	diff
	x_1	x_2	x_3	x_4		
1	3.55				-14.19	-
2	3.76	3.59	3.76	3.59	-14.71	4%
4	4.56	3.49	3.54	3.82	-15.41	9%

Table 3 Number of iteration and analysis time with or without database

# of variables	iteration		time		Reduction ratio
	w/o DB	w/ DB	w/o DB	w/ DB	
1	43	10	335	36	79%
2	110	24	1032	201	81%
4	315	57	3210	562	82%

Table 4 Constraint violation with varying number of variables

# of variables	$x(m)$				Disp(m)	diff
	x_1	x_2	x_3	x_4		
1	3.85				0.03096	-
4	4.56	3.49	3.54	3.82	0.02996	-3%

5. 결 론

본 연구에서는 아웃리거 벽체의 개구부 최적설계를 위한 다변수 제약 최적화 알고리즘을 제시하고, 최적화 결과로 도출된 아웃리거 개구부의 크기를 제시하는 것을 목적으로 하였다. 해석에 앞서 첫번째로 아웃리거의 구조 거동과 최적화 방법에 대한 선행 연구를 살펴보았다. 그리고 이후 최적화에 알맞은 유한요소해석 프로그램이 무엇인지 확인해 보고 이산 변수 제약 최적화에 알맞은 경사도 기반 알고리즘을 선택하였다. 아웃리거의 최소한의 강성을 확보해야 한다는 제약조건과 개구부의 폭을 최대화하는 목적함수를 가진 최대 최소 개구부의 폭을 규정한 제약 최적화 함수를 구현하기 위해서 순차이차계획법을 사용하여 최적화를 수행하였다. 경사도 기반 최적화 알고리즘인 순차이차계획법을 적용하기 위해서는 이산 변수의 목적함수와 제약조건 함수의 보간을 통해 미분가능한 함수를 생성해야 한다. 따라서, 해당 과정에서 미분가능한 함수를 도출하기 위해서 실수를 정수로 올림(Ceil)하고 보간하는 함수를 정의하였다. 해석의 효율성을 확보하기 위해 데이터베이스에 해석 변수와 결과를 단계별로 저장해 이미 해석된 변수에 대해서는 데이터베이스 내의 해석 결과를 사용할 수 있도록 하였다. 해석 모델에 대해 아웃리거 폭을 변경해 가며 전수 조사를 수행하여 최적화의 가능성을 확인하였다. 전수 조사 결과와 동일하게 최적화된 결과를 찾음을 확인하였고, 변수의 개수가 증가할수록 목적함수의 값이 최소화됨을 확인하였다. 데이터 베이스를 이용할 경우 최대 82%정도 해석 시간 감축이 되어 효율적인 최적화 결과를 얻어낼 수 있었다.

본 연구는 프로그램의 효율성과 실용성을 위하여 선형탄성 해석을 수행하였지만 실제로는 아웃리거 내 개구부의 크기가 늘어날 경우의 콘크리트와 철근의 비선형 거동을 고려할 수 있는 비선형해석 결과를 바탕으로 최적설계를 할 수 있도록 추후 연구가 진행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2017R1A2B4010043).

References

- Goman, W.M.H. (2016) The Evolution of Outrigger System in Tall Buildings, *Int. J. High-Rise Build.*, 5(1), pp.21~30.
- Hoenderkamp, J.C.D., Bakker, M.C.M. (2003) Analysis of High-Rise Braced Frames with Outriggers, *Struct. Des. Tall & Spec. Build.*, 12(4), pp.335~350.
- Kim, H.S., Huang, Y.T., Jin, H.J. (2019) Influence of Multiple Openings on Reinforced Concrete Outrigger Walls in a Tall Building, *Appl. Sci.*, 9(22), p.4913.
- Millman, K.J., Aivazis, M. (2011) Python for Scientists and Engineers, *Comput. Sci. & Eng.*, 13, pp.9~12.
- Parkinson, A.R., Balling, R.J., Hedengren, J.D. (2013) *Optimization Methods for Engineering Design*, Brigham Young University.
- Smith, B.S., Salim, I. (1981) Parameter Study of Outrigger-Braced Tall Building Structures, *The J. Struct. Div.*, 107(10), pp.2001~2014.
- Smith, K.N., Vantiotis, A.S. (1982) Shear Strength of Deep Beams, *ACI Structural Journal*, 79(22), pp.201~213.
- Tan, K.H., Kong, F.K., Sharp, G.R. (2003) Consistent Strut-and-Tie Modeling of Deep Beams with Web Openings, *Mag. Concr. Res.*, 55(1), pp.65~75.
- Taranath, B.S. (1975) Structural Analysis and Design of Tall Buildings, *J. Struct. Eng.*, 53, pp.18~21.
- Tseng, C.C., Hwang, S.J., Lu, W.Y. (2017) Shear Strength of Reinforced Concrete Deep Beams with web Openings, *Mag. Concr. Res.*, 114(6), pp.1569~1579.
- Wang, A. (2017) Multi-dimensional Hybrid Design and Construction of Skyscraper Cluster-Innovative Engineering of Raffles City, *Int. J. High-Rise Build.*, 6, pp.261~269.
- Yang, K.H., Eun, H.C., Chung, H.S. (2006) The Influence of Web Openings on the Structural Behavior of Reinforced High-Strength Concrete Deep Beams, *Eng. Struct.*, 28, pp.1825~1834.

요 지

본 논문에서는 초고층 건물의 철근콘크리트 아웃리거 벽체 개구부의 최적설계를 위한 수학적 최적화 프레임워크를 제시하였다. 전용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 아웃리거 벽체를 해석하였으며 깊은 보의 스트럿-타이 거동을 고려하여 개구부를 배치하였다. 최적화를 위해 파이썬 SciPy 라이브러리 중 순차이차계획법(Sequential Quadratic Programming)을 이용하여 제약 경계 최적화를 수행하였다. 최적화에 필요한 미분가능한 연속 함수를 얻어내기 위해 선형 보간법을 사용하였으며, 최적화 프로그램의 효율성을 위해 데이터베이스를 이용하였다. 2변수 최적화의 결과를 탐색 알고리즘의 이동 경로를 통해 살펴본 결과 알고리즘이 최적화된 결과를 효율적으로 찾아냄을 확인하였다. 그리고 개구부의 폭을 모두 같게 설정한 것이 아닌 각각의 개구부의 크기를 개별 변수로 설정하였을 경우 목적함수의 값이 최소화되어 더 우수한 최적화 결과를 도출함을 확인하였다. 또한, 최적화의 과정에 있어 데이터베이스를 이용할 경우 최적화 시간을 효과적으로 단축시킬 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 고층 건물, 아웃리거, 개구부, 최적설계, 순차이차계획법