

CO₂ 배출량을 고려한 매입형 합성기둥의 최적설계

Optimization of encased composite columns considering CO₂ emission

전 지 혜* · 최 세 운** · 박 효 선***

Jeon, Ji-Hye · Choi, Se-Woon · Park, Hyo-Seon

요 약

최근 환경오염 문제에 대한 관심이 고조되며 건설분야를 비롯한 각 산업분야에서는 CO₂저감 대책에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 건설분야에서의 기존 연구는 대부분 시공 후 사용 및 유지관리 단계에 집중되어 있으며, 설계단계에서 구조재료 및 비구조 재료의 적절한 사용에 관련한 연구는 초기단계이다. 그러므로 본 연구에서는 초고층건물 구조설계에서 사용되는 매입형 합성기둥 부재의 구조비용과 CO₂발생량을 동시에 최소화할 수 있는 다목적 최적설계기법을 제안하였다. 알고리즘의 검증은 위해 35층 건물의 기둥 설계에 적용하였으며, 적용결과 초기설계안보다 경제적이며 친환경적인 최적 설계안을 제시할 수 있음을 확인하였다.

keywords : NSGA-II, 최적 설계, 구조비용, CO₂배출량, 고강도 강재

1. 서론

건축 산업은 CO₂배출량의 42%, 산업폐기물의 30%, 그리고 불법폐기물의 60%를 발생하는 환경 저해 산업임에도 불구하고 친환경 연구개발은 타 산업분야에 비해 낙후된 실정이다. 특히, 기존 친환경 연구개발은 시공 후 사용 및 유지관리 단계, 즉 환경 및 설비분야에 집중되어 있고 구조재료 및 비구조 재료의 적절한 사용에 관련한 연구는 전무한 상태이다. 그러나 LCA적 사고에 비추어볼 때, 친환경적인 설계를 유도하고 기후변화협약에 대응한 환경부하 저감형 건설을 유도하기 위해서는 설계 및 시공 단계에 대한 평가가 중요시 될 수 있다(김종엽 등,2005).

현재 설계단계에서 CO₂ 배출량을 고려한 구조최적화 연구는 2D RC 예제에 대해서만 실행되었을 정도로 초기단계이다(Paya et al. 2009). 재료의 발달로 인해 고강도 재료가 초고층 공사현장에 널리 쓰이고 있으며, 복합구조 혹은 합성구조 등 여러 공법이 실제 현장에 적용되고 있기 때문에 초고층 건물에 적용할 수 있는 CO₂배출량을 고려한 구조최적화에 대한 연구가 진행될 필요가 있다.

그러므로 본 연구에서는 초고층 건물 설계 시 사용되는 매입형 합성기둥의 재료가격과 CO₂ 배출량을 고려하여 구조비용을 최소화하며 동시에 CO₂ 배출량을 최소화 할 수 있는 최적 설계 기법을 제안하고자 한다. 제안된 최적 설계 기법은 구조비용과 CO₂ 배출량을 목적함수로 설정하고, 부재의 응력과 시공성을 제약조건으로 설정함으로써 경제적이면서 동시에 친환경적인 설계안을 유도하고자 한다.

* 학생회원 · 연세대학교 건축공학과 석사과정 jjh0604@yonsei.ac.kr
** 정 회 원 · 연세대학교 건축공학과 박사과정 watercloud@yonsei.ac.kr
*** 정 회 원 · 연세대학교 건축공학과 교수, 공학박사 hspark@yonsei.ac.kr

2. 최적화 알고리즘

2.1 NSGA-II

단일 목적 문제의 경우에는 가장 우수한 해를 최적해라고 할 수 있지만, 목적함수가 두 개 이상인 경우에는 반드시 최우량 해가 한 개라고 할 수 없다. 그러므로 다목적 최적화 문제에서는 각각의 해를 단순 비교할 수 없기 때문에 다른 어떤 해에도 뒤떨어지지 않는 해 집합을 얻게 되며, 이와 같은 해 집합을 Pareto 최적해, 혹은 비우월해라 부른다.

NSGA-II의 전체적인 흐름은 다음과 같다. 먼저 구조물의 형상, 단면 DB, NSGA-II 파라미터 등의 정보를 읽어 들인 후, 초기 모집단을 형성한다. 모집단의 교배 및 돌연변이를 통해 형성된 자손세대와 부모세대 각각의 목적함수와 제약조건 위배율을 계산하고 각 개체들의 지배(dominance)관계에 따라 순위(rank)와 군집도 거리(crowding distance)를 결정한다. 제약조건을 만족하며 순위 값이 작고 군집도거리의 값이 큰 순서대로 다음세대의 새로운 개체군을 형성하게 된다. 결과적으로, 위와 같은 과정을 반복함에 따라 제약조건을 위배하지 않으면서 순위가 1인 비지배 최적해의 집합을 얻게 된다.

2.2 정식화

본 연구에서 사용된 목적함수와 제약조건은 다음과 같다. 먼저 두 가지의 목적함수를 사용하였으며 첫 번째 목적함수는 매입형 합성 기둥의 강재와 콘크리트의 강도별 재료 단가를 고려한 구조비용을 최소화 하는 것으로 식 (1)과 같고, 두 번째 목적함수는 강재와 콘크리트의 강도별 단위CO₂발생량을 고려하여 건물의 CO₂ 발생량을 최소화 하는 것으로 식 (2)과 같다.

$$\text{Minimize } f_1 = \sum_{i=1}^M A_{stl}^i L^i \rho_{stl} C_{stl} + A_{con}^i L^i C_{con} \quad (1)$$

$$\text{Minimize } f_2 = \sum_{i=1}^M A_{stl}^i L^i F_{stl} + A_{con}^i L^i F_{con} \quad (2)$$

여기서, f_1 은 첫 번째 목적함수로 기둥열의 구조비용이며, f_2 는 두 번째 목적함수로 기둥열의 CO₂ 배출량을 의미한다. A , L , ρ , C 는 각각 부재 단면적과 부재 길이, 재료 밀도, 재료가격을 나타내며, F 는 재료 단위 당 CO₂ 배출량을 나타내며 지식경제부 자료를 참조하였다. 하첨자 stl , con 은 각각 강재와 콘크리트, 상첨자 i 는 i 번째 부재, M 은 한 기둥 열에서 총 부재의 개수를 나타낸다.

다음으로 본 연구에서는 기둥 부재의 응력과 시공성에 대한 제약으로 5가지의 제약조건을 사용하였다. 응력에 대한 제약은 한국강구조학회 강구조설계 기준(2003)을 따라 응력비가 1.0을 초과하지 않도록 식(3)과 같이 제약하는 것이다. 시공성에 대한 제약은 인접한 두 개 층에서 위 층 부재의 전 단면적, 강재의 내측 치수, 강재의 항복 강도, 콘크리트의 압축 강도가 아래층보다 크지 않도록 식(4)~(7)과 같이 제약하는 것이다. 그러나 제약조건이 수가 많아지면 수렴에 필요한 반복회수가 증가하게 되므로 본 연구에서는 응력 제약 조건만을 주 제약조건으로 고려하였으며, 시공성에 대한 제약 조건은 부 제약조건으로 사용하였다. 부 제약조건은 식(4)~(7)의 시공성 제약조건이 위배될 경우 상층부의 단면을 수정하는 과정으로 알고리즘에 포함시켰다.

$$\frac{\sigma_{actual}^i}{\sigma_{allow}^i} \leq 1.0, \quad i = 1, \dots, M \quad (3) \quad \frac{F_y^{i+1}}{F_y^i} \leq 1.0, \quad i = 1, \dots, M-1 \quad (6)$$

$$\frac{A_g^{i+1}}{A_g^i} \leq 1.0, \quad i = 1, \dots, M-1 \quad (4)$$

$$\frac{f_{ck}^{i+1}}{f_{ck}^i} \leq 1.0, \quad i = 1, \dots, M-1 \quad (7)$$

$$\frac{S_{stl}^{i+1}}{S_{stl}^i} \leq 1.0, \quad i = 1, \dots, M-1 \quad (5)$$

$\sigma_{allow}, \sigma_{actual}$: 부재의 허용응력, 실제응력
 A_g, S_{stl} : 부재의 전단면적, 강제 내측 치수

F_y, f_{ck} : 강재의 항복강도, 콘크리트 압축강도
 $i, i+1$: 인접한 두 개 층

3. 예제적용

본 장에서는 최적화 알고리즘을 서지현(2008)에서 적용된 지상35층, 지하6층의 주상복합 건물에 적용하였으며 건물의 형상은 그림 1과 같다. 이 건물은 건물골조방식으로서 횡력은 전단벽이 부담하고, 매입형 합성 기둥과 강재보로 구성된 모멘트골조는 중력하중만을 부담한다. 본 예제에서는 19 종류의 기둥열 중 13개의 그룹으로 이뤄진 한 기둥열을 대상으로 알고리즘을 적용하였으며, 매입형 합성 기둥 부재의 데이터베이스는 서지현(2008)논문에서 사용된 데이터베이스에 재료 단위 당 CO₂발생량 데이터를 추가해 사용했다.

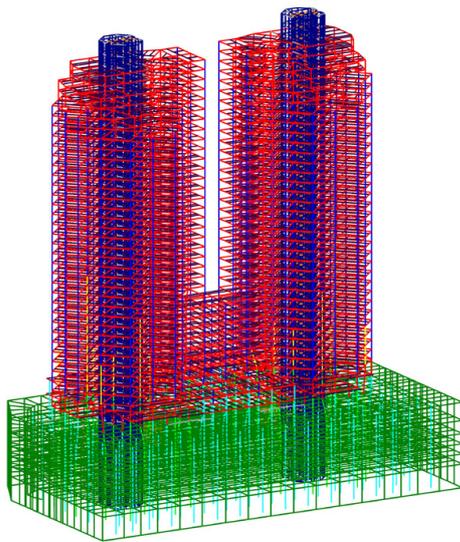


그림 1 예제 구조물

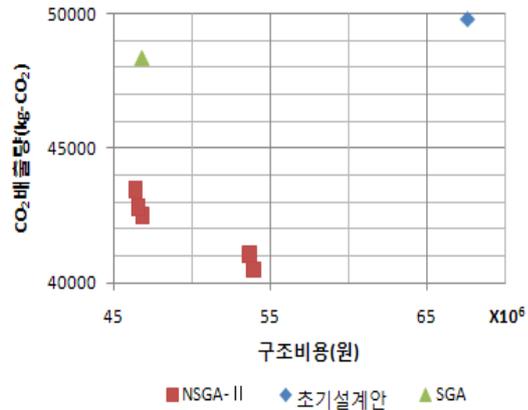


그림 2 초기설계안, 다목적 최적해, 단목적 최적해

본 연구에서는 구조비용과 CO₂배출량 두개의 목적함수를 동시에 고려하기 위해 파레토에 기반한 NSGA-II(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II)을 이용하였다. NSGA-II의 파라미터는 Deb et al.(2002)의 연구 결과를 토대로, 2진수를 사용하는 본 연구에서는 0.9의 교차율과 0.0085의 돌연변이율을 사용한다. 한 모집단의 개체수는 50개이며, 종료조건은 비지배 해의 개수가 최소 10개 이상인 조건 하에서 변화율이 3%이하인 엘리트 집단의 세대 반복 횟수가 5회이면 종료하도록 하였다.

그림 2는 알고리즘을 수행한 결과를 나타내었으며, 이를 초기 설계안과 구조비용에 대한 단일 최적 설계안의 결과와 비교하였다. 그림 2에 나타난 것처럼 NSGA-II 최적설계안이 초기 설계안보다 목적함수 구조비용과 CO₂ 배출량 두 가지 모두에 대하여 효과적인 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 구조비용에 대한 단일 최적

설계안의 결과(서지현,2009)와 비교해봤을 때 비용수준은 유지하며 CO₂배출량은 감소된 결과를 얻을 수 있었다. 결과 중 한 최적 설계안의 구조비용은 53,945,855원, CO₂배출량은 41,054kg-CO₂이며, 이 결과는 초기설계안에 비해 약 20.5%의 비용이 절감되었고 약 17%의 CO₂배출량이 감소된 경제적이며 친환경적인 설계안이다.

4. 결론

본 알고리즘을 고층건물 기둥열에 적용한 결과 효과적으로 최적의 해를 찾아가는 것을 확인할 수 있었다. 그림 2에서 제시된 알고리즘의 결과를 통해 설계자는 CO₂배출량과 비용측면 각각에 대해 경제적이며 동시에 친환경적인 설계안을 선택할 수 있다.

본 연구에서는 재료의 강도별 변화에 대해 동일한 CO₂배출량을 사용하였다. 후에 고강도 재료의 CO₂배출량에 대한 DB가 구축된다면 좀 더 효과적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 알고리즘을 매입형 합성기둥 부재를 사용한 고층건물뿐만 아니라 좀 더 다양한 예제에 적용하기 위해 철근콘크리트 DB의 구축이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사드립니다.(No. 2010-0027246)

참고문헌

- 서지현 외 3명 (2008) 고강도 강재를 사용한 건물골조방식 초고층 건물의 구조비용 최적화, 한국전산구조공학회 논문집, 22(1), pp.53~63.
- 김종엽 외 2명 (2005) 공동주택 신축단계에서의 에너지 소비 및 CO₂배출 특성 평가, 대한건축학회논문집 계획계, 21(4), pp.199~206.
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T (2002) A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2) pp. 182~197.
- I. Paya, V. Yepes, Gonzalez-Vidosa and A. Hospitaler (2009) CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. Engineering Structures, 31(7), pp. 1501~1508.