

프리텐션을 받는 트러스 구조물의 좌굴을 고려한 최적설계

Optimum Design of Truss Structures with Pretension Considering Buckling Constraint

김 연 태¹⁾ · 김 대 환²⁾ · 이 재 홍³⁾
Kim, Yeon Tae · Kim, Daehwan · Lee, Jaehong

요 약 : 언더텐션이란 상부에서의 하중을 하부 케이블의 인장력을 이용하여 그 하중을 양 단부로 전달하는 시스템을 말하며 처짐과 부재 크기를 제어하기 위해 장스팬 구조물에 주로 적용된다. 하지만 수많은 단면 중에서 여러 조건을 만족하며 최소의 물량, 즉 최대의 경제성에 부합하는 최적의 단면을 찾는 것은 매우 어려운 일이다. 이에 본 연구에서는 마이크로 유전알고리즘을 이용하여 언더텐션 형태의 트러스 구조물에 단면 최적화 연구를 수행하였으며 처짐과 허용응력 그리고 좌굴이 제약조건으로 고려되었다. 최적화 검증 예제로 자주 사용되는 10-bar 트러스 예제의 이전 연구 결과와의 비교를 통하여 개발된 프로그램을 검증하였다. 이를 바탕으로 프리텐션 크기를 변수로 설정하여 언더텐션 구조물의 최적 설계를 수행하였다. 본 연구에서 제시된 최적설계 그래프를 통하여 설계자가 일정 조건을 만족하는 최적의 단면을 쉽게 선택할 수 있을 것으로 사료된다.

ABSTRACT : An under-tension system is frequently employed for large-span structures to reduce the deflection and member size. In this study, a microgenetic algorithm was used to find the optimum cross-section of truss structures with an under-tension cable under transverse loading. Maximum deflection, allowable stress, and buckling were considered constraints. The proposed approach was verified using a 10-bar truss sample that shows good agreement with the previous results. In the numerical results, minimum-weight design of the under-tension structure was performed for various magnitudes of pretension.

핵심용어 : 언더텐션 시스템, 최적설계, 마이크로 유전 알고리즘, 트러스

KEYWORDS : under-tension system, optimum design, micro-genetic algorithm, truss

1. 서론

세계적인 도시화의 진행과 인구의 증가로 대부분의 대도시의 경우 지가 상승과 용지 부족이 발생하고 있으며, 이는 도시 내 기반시설 중 하나인 녹지 및 휴게공간의 확보를 어렵게 만들고 있는 것이 사실이다. 또한 도시 내에 녹지 및 휴게공간이 확보된 경우에도 각각의 개별사업에 의존하여 점적으로 발생되어 그 양이 늘어나는 성과에 비하여, 주변공간과의 연계성에는 소극적인 양상으로 보이고 있다. 그러나 대도시의 녹지 및 휴게공간과 빠른 도시화의 공존은 불가피한 현실이다. 이제 맞추어 도심내의 교차로 및 일반 도로 상부에 휴식과 통행이 가능한 공간을 조성하여 녹지 및 휴게공간을 확보하고 각 구역간의 연결성 및 접근성을 높일 수 있는 장스팬 구조물의 필요성이 커져가고 있으며 이를 해결하기 위한 방법으로 언더텐션 시스템

이 대두되고 있다.

언더텐션 시스템은 구조물 하부에 케이블을 연결하고, 그 케이블에 인장력을 가해 구조물의 처짐과 부재 크기를 제어하는데 그 이점을 가지는 복합구조물이다. 언더텐션 시스템에 대한 기존의 연구 동향을 살펴보면, Wang(2004)과 Motro(2003) 그리고 Broughon(2008)에 의해 케이블-스트럿 구조로 소개되었다. 국내에서는 Tran과 Lee(2009)에 의해 언더텐션의 처짐 및 응력 계산이 가능한 언더텐션의 해석 프로그램을 개발되었으며, 박덕근(2008)에 의해 프리텐션을 따른 언더텐션의 비선형 해석에 대한 연구가 진행되었다.

그러나 언더텐션 구조물은 아직까지 연구가 미비하며 특히 최적설계에 대한 연구는 국내의 경우 아직 수행된 바 없으며 Levy(1992)에 의해 인장력이 가해진 트러스 구조물의 최적설계만이 선행연구 되었으며 이 또한 매우 제한된 조건과 예제만이 제시되었다.

1) 교신저자. 세종대학교 대학원 건축공학과, 석사과정
(Tel. 02-3408-3287, Fax. 02-3408-4331, E-mail : yonae_kim@naver.com)

2) 세종대학교 대학원 건축공학과, 석사과정(regkdh@naver.com)

3) 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사(jhlee@sejong.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

최적화란 여러 제약조건들을 모두 만족하며 최소의 물량으로 최고의 구조성능 발현을 목적으로 함을 의미하며 이는 구조 엔지니어의 최대 목적이며 관심사이다. 과거의 경험에 근거한 직관적인 설계가 아닌 체계적이며 합리적인 설계의 필요성에 의해 최적설계의 중요성은 부각된 지 오래이다. 본 연구의 기본이 되는 트러스 구조물의 최적화 기법에 대한 근래의 연구 동향을 살펴보면 국외와 국내 등 대부분 유전자 알고리즘을 이용하여 최소중량최적화를 수행하고 있으며 매우 많은 연구자들에 의해 선행 연구되어 있다.

그러나 위의 연구들은 프리텐션이 도입되지 않은 경우의 최적화이며, 이에 본 연구에서는 Krishnakumar(1989)가 제안한 마이크로 유전알고리즘(Micro Genetic Algorithm : μ -GA)의 유전연산자를 언더텐션의 최적설계에 적합하도록 수정하여 언더텐션 시스템의 최적설계 프로그램을 개발하였다. 마이크로 유전 알고리즘은 신경망 모델에 비해 많은 장점을 가지고 있으며 김여근(1999)의 휴리스틱(Heuristic) 최적화 기법으로 최근 자주 사용되고 있는 유전알고리즘 중 하나로, 김선명(2001)과 김영빈(2003)에 의해 냉간성형강 부재의 단면 최적설계와 I-형 복합재료 보의 최적설계의 연구에 사용된 바 있다.

본 연구에서는 마이크로 유전알고리즘을 이용하여 언더텐션 시스템의 최적설계를 수행하였다. 이때 일반적인 언더텐션시스템과는 다르게 모든 부재를 트러스 부재로 가정하고 인장재에 프리텐션을 도입하였으며 보다 실무에 적합한 설계가 가능하도록 한국강구조학회(2009)에서 발행한 KBC 2009의 일반구조용 탄소강 강관의 표준치수를 선택 가능한 단면적에 적용하였다. 본 최적화 알고리즘을 검증하기 위해 최적화 검증예제로 자주 사용되는 10-bar 트러스의 이전 연구 결과와 비교하여 언더텐션 시스템의 최적설계에 대한 신뢰성을 검증하였다. 이를 바탕으로 프리텐션 크기에 따른 언더텐션 시스템의 최적 설계를 수행, 이에 따른 각각의 물량 감소량을 비교하여 언더텐션의 처짐 및 부재크기 제어 효과를 입증하고자 한다.

2. 언더텐션 시스템

언더텐션 시스템은 케이블-스트럿 구조로 불리며 그림 1에서 보이는 바와 같이 강재로 이루어진 상현재와 하부의 케이블 그리고 이들을 연결시키는 스트럿으로 이루어진 구조물이다. 케이블에 초기 인장력을 도입할 경우 상현재에 상향의 힘이 전달되어 구조물이 상향으로 거동하게 되며 이를 통해 구조물 전체적으로 처짐을 제어하며 부재의 크기를 조절 가능하다. 그림 2를 통해 언더텐션 시스템의 구조적 장점을 확인할 수 있다. 언더텐션 시스템은 하부 인장재에 프리텐션을 도입하므로써 처짐을 제어할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 이러한 언더텐션 시스템의 장점을 이용하여

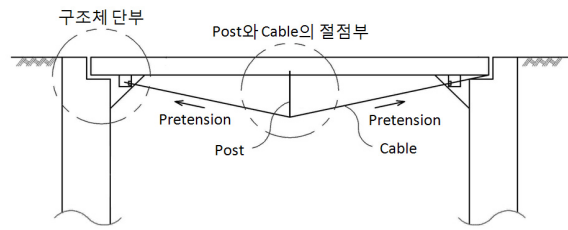


그림 1. 언더텐션 시스템의 모식도

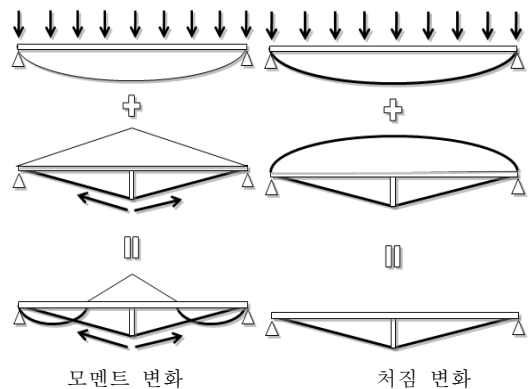


그림 2. 언더텐션 시스템의 구조적 장점

언더텐션 형태의 트러스 구조물을 이용하여 최적화를 수행하였다.

3. 마이크로 유전 알고리즘

설계 시에 수많은 단면적의 경우 중에서 여러 조건을 만족하는 최적의 단면적을 찾는 것은 매우 어려우며 이를 위해 최적화 연구가 필요하다고 할 수 있다. 여기에서 최적화란 최소의 물량으로 수많은 단면 크기 중에서 사용자가 요구하는 모든 조건을 만족하는 최적의 단면 크기를 찾는 것을 의미한다.

이런 최적화 기법 중 하나인 유전자 알고리즘은 자연 진화의 알고리즘을 이용하여 보다 우월한 유전자 즉, 최적의 단면적을 찾는 기법이다. 유전알고리즘은 많은 개체를 운용할수록 최적값을 안정적으로 구할 수 있다는 장점이 있지만 개체 수만큼의 구조해석 횟수가 필요하므로 개체수의 증가는 계산 량의 증가와 직결된다. 또한 계산 량의 증가는 고성능 컴퓨터 및 최적 값을 찾는 동안 많은 시간을 필요로 하게 된다. 이를 보완하기 위해 Krishnakumar(1989)는 적은 개체군을 운용하고 설계 변수가 적은 문제에 높은 효율성을 보여주는 마이크로 유전알고리즘을 하였다.

마이크로 유전알고리즘은 단순 유전알고리즘에 비해 더욱 단순한 유전연산을 사용하므로 단순 유전알고리즘에서와 같은 까

다로운 매개변수 설정을 피할 수 있으며 적은 수의 개체를 사용하므로 개체 증가에 따른 해석시간의 증가 및 대형연산기의 필요성을 줄일 수 있다. 또한 마이크로 유전알고리즘에서는 기존의 유전알고리즘에서 중요한 연산을 담당하여 진화의 연료라고 불리던 돌연변이 연산을 배제하였다. 돌연변이 연산을 배제하는 대신 재시동 연산과 교배율을 1.0으로 하여 모든 개체가 교배연산을 수행하도록 하였으며, 이로 인해 돌연변이 연산이 배제되었음에도 불구하고 다양한 탐색을 할 수 있도록 배려하고 있다. 그 밖의 장점으로 돌연변이 연산을 수행하지 않으므로 돌연변이율 및 돌연변이 방법설정에 있어서 까다로운 변수 설정을 피할 수 있다. 그림 3은 마이크로 유전알고리즘의 개략적인 흐름도이며 각 단계별 과정은 다음과 같다.

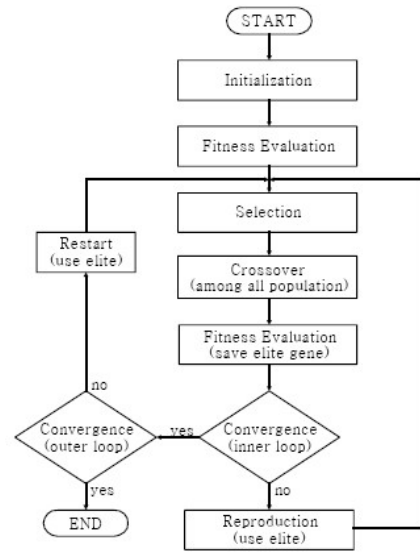


그림 3. 마이크로 유전알고리즘(μ-GA)

step 1 : 설계변수로 이어진 이진 스트링에 랜덤함수를 이용하여 0과 1의 스트링을 생성한다. 이때 가용역의 해를 보장하기 위하여 가장 큰 부재만을 갖는 개체를 하나 삽입하며 계산량 감소를 위해 10개 내외의 개체군을 생성한다.

step 2 : 최초 생성된 개체들의 수렴성 여부를 검토하여 내부루프와 외부루프 중 수행할 루프를 결정한다. 수렴성 검토 결과, 해의 개선 없이 수렴조건을 만족하면 내부루프를 종료하고 외부루프의 조건을 검토하며 외부루프의 종료조건을 만족하지 못하면 재시동한다. 본 연구에서 사용한 마이크로 유전알고리즘은 내부루프와 외부루프의 종료조건을 사용하여 시동과 재시동 연산을 수행한다.

step 3 : 개체의 적합도를 평가한다. 개체의 적합도를 평가할 때 유전알고리즘은 적응도가 높은 개체를 존속시킴으로서 최소화 목적함수를 다음과 같은 최대화 함수로 변형시켜 적합도를 평가한다.

$$\text{Maximize } \tilde{F}(X) = C_{\max} - F(X) \quad (1)$$

일반적으로 C_{\max} 는 상수로서 $\tilde{F}(X)$ 가 음수가 되지 않을 만큼 큰 수를 택한다. 목적함수는 최소값을 구하는 함수이지만 유전알고리즘에서는 높은 적합도를 갖는 개체가 교배 등의 유전연산에 참여할 수 있는 확률을 높여야하므로 가목적함수를 구성하여 적합도를 평가한다.

step 4 : 적합도 평가를 기초로 교배할 개체를 선택하여 교배연산을 수행한다. Krishnakumar(1989)가 최초로 제안한 마이크로 유전알고리즘에는 일점 교배를 수행하도록 되어 있으나, 본 연구에서는 적은 디자인 변수임에도 각 디자인 변수의 간격을 세분화하여 사용하므로 넓은 디자인 영역을 사용하고 이에 따른 이진스트링의 길이가 길어지는 특징을 보이고 있

다. 이런 특징을 고려하여 보다 효율적인 디자인영역의 탐색효과를 얻을 수 있는 이점 교배를 사용하였다.

step 5 : 교배를 통해 새롭게 생성된 개체에 엘리트 개체를 포함시켜 수렴성을 검사한다. 내부루프의 수렴 조건을 만족하지 못하면 동일한 내부 마이크로 유전알고리즘을 수행하고, 내부루프의 종료 조건을 만족하면 외부루프의 종료조건을 검사하며 이를 만족하면 알고리즘을 종료하고 그렇지 못하면 재시동을 하게 된다.

step 6 : 재시동 시에는 엘리트 개체를 제외한 나머지 개체들을 랜덤함수를 이용하여 새롭게 구성하게 되며 엘리트 개체는 지난 세대의 진화의 결과를 나타내며 새롭게 생성된 개체는 개체군에 새로운 형질을 부여하여 다양한 탐색을 가능하게 하는 작용을 한다.

이에 본 연구에서는 Krishnakumar(1989)가 제안한 기존의 마이크로 유전알고리즘을 바탕으로 개발한 프로그램의 순서도는 그림 4와 같다. 먼저 기하학적 형상 및 물성치를 입력한 후, 가능한 모든 설계변수의 후보군을 생성한다. 초기 염색체 정보를 랜덤함수를 이용하여 생성하고 유전 개념에 일치하도록 하기 위해 각 집단마다 염색체 정보를 이진 스트링으로 변환한다. 그 다음 과정으로 최적화 단계에 핵심이라 할 수 있는 각 집단마다 트러스 구조물에 대한 계산 프로그램을 이용하여 응력 및 처짐 등의 결과를 얻어내며, 이 값들을 토대로 벌칙함수와 목적함수를 계산한다. 계산된 목적함수들을 비교하여 설정된 목적함수의 최대가 되는 개체군을 선택한다. 토너먼트 과정에서는 우월한 유전자들을 선택하기 위해 몇 개의 염색체로 이루어진 집단을 토너먼트 형식으로 비교를 거듭하여 최후의

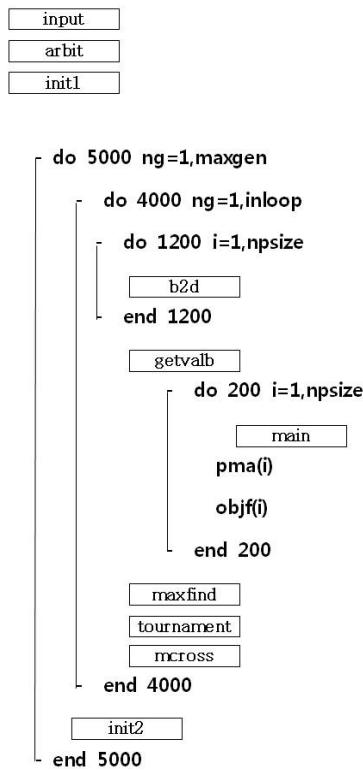


그림 4. 개발된 프로그램의 흐름도

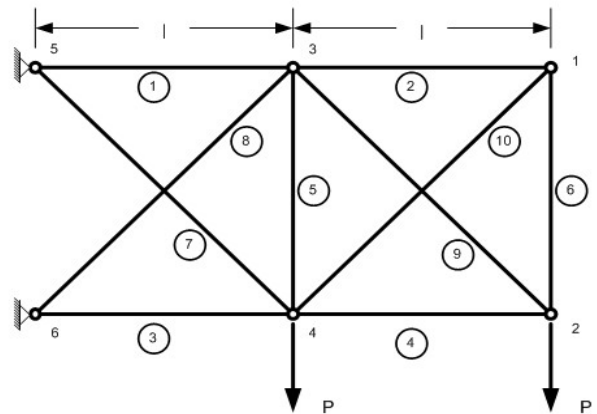
우월한 인자를 결정한다. 교배는 두 개의 부모해의 특징을 부분 결합하여 하나의 새로운 해를 만드는 연산자로 이를 통해 다양성을 고려한 연산이 가능하게 된다. 이 내부의 루프가 모두 종료될 경우, 다시 한 번 초기 탐색체 정보를 생성하여 도입함으로써 보다 다양한 해가 고려될 수 있도록 설정하였다. 이 모든 과정을 각 세대마다 반복함으로써 세대가 지남에 따라 보다 우수한 최적단면을 찾게 된다.

4. 해석 검증 예제

마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 개발된 본 프로그램으로 트러스 구조물의 최적화를 위해서는 우선적으로 신뢰성이 확보되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 신뢰성 확보를 위해서 선행 연구되어 얻은 최적화 값과의 비교를 통해 본 프로그램을 검증하였다. 그에 대한 예제로는 최적화 검증 예제로 많이 쓰이는 10-BAR 트러스 및 25-BAR 트러스를 선정하였다.

4.1 10-bar 트러스 최적 설계

마이크로 유전알고리즘을 이용하여 개발된 본 프로그램을 검증하기 위해 최적화 검증 예제로 자주 사용되는 10-BAR 트러스의 최적설계를 수행하여 본 연구와 Haftka(1992)에



$l=360$ Inch , $P=100$ Kips

그림 5. 10-BAR 트러스

의해 수행된 결과를 비교하였다.

해석 모델은 그림 5와 같이 10개의 트러스 요소로 이루어진 구조물로 4번과 6번 절점에 각 100kips의 하중이 재하되며 탄성계수(E)는 10,000ksi이며 밀도는 0.1lbm/in³이다. 목적함수는 수식 2와 같이 각각 요소의 단면적과 길이를 곱한 값을 합하여 밀도를 곱한 값, 즉 구조물의 총 중량을 그 목적함수로 설정하였다. 제약조건으로는 수식 3과 같이 각각 요소의 응력은 허용응력 이상이 되지 않도록 제약하였으며 9번 요소를 제외한 허용응력은 25ksi, 9번 요소는 75ksi로 설정하였으며 각각의 단면적들은 0.1in² 이상이 되도록 제약 조건을 설정하여 최적화 해석을 수행하였다.

Minimize

$$\left(\sum A_i \cdot l_i\right) \cdot density \tag{2}$$

Subject to

$$\sigma(i) \leq \sigma_{allowable} \tag{3}$$

$$A_i \geq 0.1 \text{ in}^2$$

그림 6은 최적화를 위해 수정된 프로그램을 이용하여 10-bar truss를 수행한 결과로, 수렴 시까지 약 10분의 시간이 소요되었다. 가로축은 최적 값을 찾기 위해 수행된 연산의 횟수이며 세로축은 총 단면적에 밀도를 곱한 값 즉, 목적함수인 구조물의 중량을 의미한다. 본 연구에서 사용된 알고리즘은 무작위 탐색법이라는 기법을 이용하여 최적화를 수행한 경우라서 확실적인 변수가 존재한다. 이러한 이유로 최적 값을 얻기 위해 100의 세대수를 잡았으며 세대가 지남에 따라 해의 개선이 줄어들면서 안정성 있는 수렴결과를 보여 주고 있다. 최적화를 통해 수렴된 값은 1556.2(lb)로 검증예제의 값 1499.0(lb)와 3.5%의 오차를 보였다.

또한, 아래의 표 1은 본 프로그램의 해석결과와 Haftka

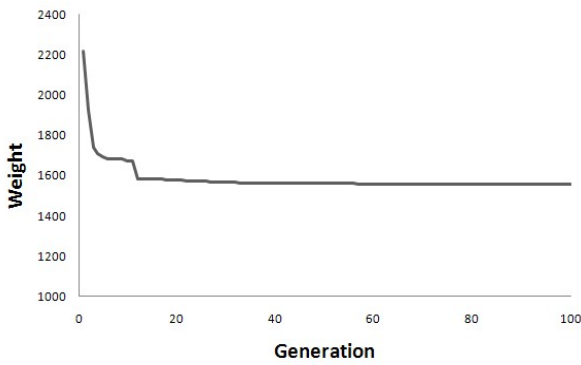


그림 6. 10-BAR 트러스의 최적중량 수렴곡선

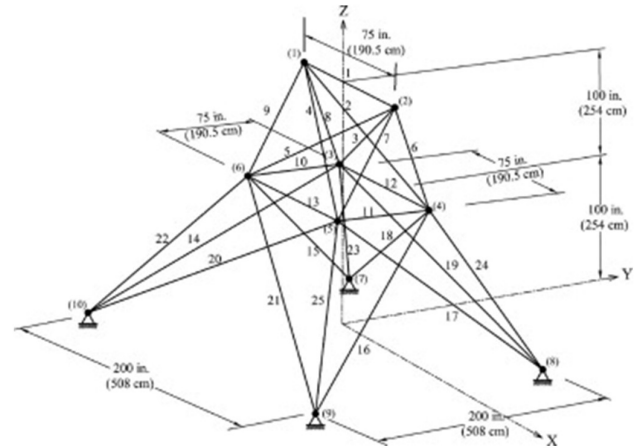


그림 7. 25-BAR 트러스 모델

표 1. 이전연구와의 최적단면 및 응력 비교

요소	최적 단면 (in ²)		응력 (ksi)	
	본 연구	Haftka	본 연구	Haftka
1	7.80	7.90	24.95	25.00
2	0.22	0.10	24.91	25.00
3	8.16	8.10	-24.99	-25.00
4	4.10	3.90	-22.87	-25.00
5	0.10	0.10	-2.15	-0.070
6	0.22	0.10	24.95	25.00
7	6.51	5.80	22.85	25.00
8	5.58	5.51	-24.04	-25.00
9	3.60	3.68	37.27	37.50
10	0.31	0.14	-24.99	-25.00

(1992)에 의해 수행된 검증예제를 비교한 것으로 최적화된 각각의 부재 단면적과 응력 값을 나타낸다. 본 연구의 결과는 수학적으로 매우 정확히 계산된 이전 연구의 결과와 매우 적은 오차를 보이고 있으며 이를 통해 본 프로그램의 신뢰성을 확인하였다.

4.2 25-bar 트러스 최적 설계

마이크로 유전알고리즘을 이용하여 개발된 본 프로그램을 검증하기 위해 최적화 검증 예제로 자주 사용되는 25-BAR 트러스의 최적설계를 수행하여 본 연구와 Kaveh(2009)에 의해 수행된 결과를 비교하였다.

해석 모델은 그림 7와 같이 25개의 트러스 요소로 이루어진 구조물로 표 2의 조건으로 하중이 재하 된다. 탄성계수(E)는 10000ksi이며 밀도는 0.11bm/in³ 이다. 목적함수는 수식 2와 같이 각각 요소의 단면적과 길이를 곱한 값을 합하여 밀도를 곱한 값, 즉 구조물의 총 중량을 그 목적함수로 설정하였다. 제약조건으로는 수식 3과 같이 각각 요소의 응력은 허용응력 이상이 되지 않도록 제약하였으며 10-bar 트러스 예제와 달리 허용응력은 인장응력과 압축응력을 부재마다 달리 적용하였으며 그 조건은 표 3과 같다. 또한 수식 5와 같이 제약조건으

로 1번과 2번 절점의 허용 처짐을 설정하였으며 선택가능한 단면적은 0.01부터 3.4in²로 범위를 제한하였다.

구조물이 대칭이므로 대응되는 부재들을 같은 변수로 설정하여 설계 변수 증가로 인한 계산 량 및 설계시간의 증가를 피한다. 그 결과 표 3과 같이 25개의 설계 변수들을 8개로 감소하여 설계를 수행하였다.

$$\text{Minimize} \quad (\sum A_i \cdot l_i) \cdot \text{density} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Subject to} \\ \sigma(i) &\leq \sigma_{\text{allowable}} \\ \delta(i) &\leq \delta_{\text{allowable}} \\ 0.01 &\leq A_i \leq 3.4 \text{ in}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

표 2. 재료 물성치

절점	Px (kips)	Py (kips)	Pz (kips)
1	1.0	10.0	-5.0
2	0.0	10.0	-5.0
3	0.5	0.0	0.0
6	0.5	0.0	0.0

표 3. 부재응력 제약조건

설계변수	압축응력 제한조건(ksi)	인장응력 제한조건(ksi)
1	A ₁	35.092
2	A ₂ ~ A ₅	11.590
3	A ₆ ~ A ₉	17.305
4	A ₁₀ ~ A ₁₁	35.092
5	A ₁₂ ~ A ₁₃	35.092
6	A ₁₄ ~ A ₁₇	6.759
7	A ₁₈ ~ A ₂₁	6.959
8	A ₂₂ ~ A ₂₅	11.082

표 4. 이전연구와의 최적단면 및 물량 비교

설계변수	최적 단면적 (in ²)							
	Rajeev and Krishnamoorthy	Schutte and Groenwold	Lee and Geem	Kaveh et al.	Kaveh and Talatahari		Camp	본 연구
	GA	PSO	HS	IACS	PSACO	HPSACO	BB-BC	
1 A ₁	0.10	0.001	0.047	0.010	0.010	0.010	0.010	0.45
2 A ₂ ~ A ₅	1.80	2.121	2.022	2.042	2.052	2.054	2.092	1.06
3 A ₆ ~ A ₉	2.30	2.893	2.950	3.001	3.001	3.008	2.964	2.99
4 A ₁₀ ~ A ₁₁	0.20	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.15
5 A ₁₂ ~ A ₁₃	0.10	0.010	0.014	0.010	0.010	0.010	0.010	0.02
6 A ₁₄ ~ A ₁₇	0.80	0.671	0.688	0.684	0.684	0.679	0.689	0.63
7 A ₁₈ ~ A ₂₁	1.80	1.611	1.657	1.625	1.616	1.611	1.601	2.11
8 A ₂₂ ~ A ₂₅	3.0	2.717	2.663	2.672	2.673	2.678	2.686	2.99
물량(lb)	546	545.21	544.38	454.03	545.04	544.99	545.38	546.9

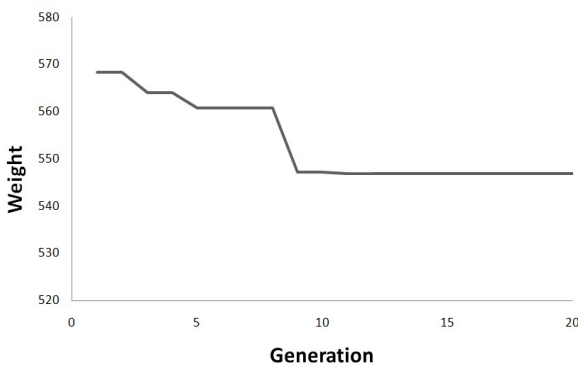


그림 8. 10-BAR 트러스의 최적중량 수렴곡선

그림 8은 최적화를 위해 수정된 프로그램을 이용하여 25-bar truss를 수행한 결과로, 수렴 시까지 약 5분의 시간이 소요되었다. 가로축은 최적 값을 찾기 위해 수행된 연산의 횟수이며 세로축은 총 단면적에 밀도를 곱한 값 즉, 목적함수인 구조물의 중량을 의미한다. 세대가 지남에 따라 안정성 있는 수렴결과를 보여 주고 있으며 수렴된 값은 546.9(lb)로 표 4에서 검증 예제의 이전연구 결과와 매우 유사함을 확인하였다. 10-bar 트러스 예제와 달리 수렴의 과정이 단순하고 신속한 이유는 10-bar 트러스 예제가 단면적 후보의 범위가 제한이 없어 광역의 범위를 검색한 반면, 25-bar 트러스 예제의 경우 수식 5에서 확인 할 수 있듯, 하나의 제한조건으로서 단면적 후보의 범위가 상대적으로 매우 적기 때문이다.

또한, 아래의 표 4은 본 프로그램의 해석결과와 A.Kaveh에 의해 연구된 유전자 알고리즘을 포함한 최적화 알고리즘들의 이전 연구 결과를 비교한 것으로 최적화된 각각의 부재 단면적과 물량을 나타낸다. 본 연구의 결과는 이전 연구의 결과들과 매우 적은 오차를 보이고 있으며 이를 통해 본 프로그램의 신뢰성을 확인하였다.

5. 언더텐션 시스템 최적 설계

5.1 언더텐션 시스템 모델

실제 거동과 가장 비슷한 결과를 얻어내기 위해서는 3차원 모델링을 통하여 구조해석을 수행하여야 하지만, 본 연구에서는 단순화된 2차원 트러스 모델을 바탕으로 하여 구조해석을 수행하였다. 이는 구조 모델링에 걸리는 시간을 단축하고, 부재의 휨 변형을 제한함으로써 언더텐션 케이블이 구조물에 미치는 영향을 보다 분명하게 확인하기 위함이다.

본 연구에서 구조 해석을 수행하는 데에 기본적으로 가정된 사항은 다음과 같다.

- (1) 구조물에 있어서 초기 부재의 비틀림과 기초 구조의 회전, 수직하중에 의한 변형 등은 고려하지 않는다.
- (2) 트러스의 변형 시에는 단면의 면적은 일정한 값을 유지한다.

그림 9에서 보이는 형상과 같이 본 모델은 총 경간이 60m이며 1m 단위로 상부가 분할되어 있다.

또한, 본 논문에서 사용된 모델은 12개의 절점과, 21개의 요소로 이루어져 있으며, 수직 스트럿의 상부 절점의 연직방향에서 모두 같은 크기인 100kN 하중이 재하 되는 것으로 가정하였다. 하중의 경우, 실제의 구조물에서는 상부에서 연직방향으로 전 면적에 걸쳐서 재하 되어야 하지만, 해석의 단순화를 위하여 구조물의 상부에서 연직방향으로 다섯 지점에 하중이 재하 되는 것으로 가정하였다. 모든 부재는 트러스로 이루어져 있으며, 양 단부도 힌지로 구성되어 있다. 본 예제는 스틸과 케이블 두 재료로 각각의 재료 물성치는 표 5에 제시되어

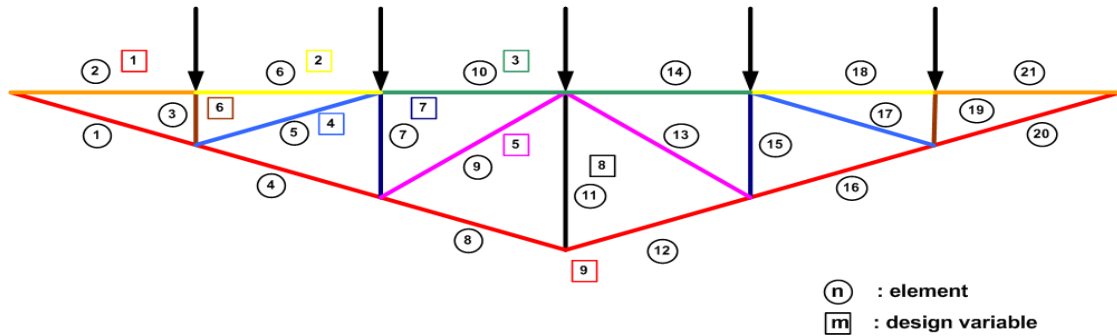


그림 9. 해석 모델의 요소 위치 및 하중 재하점

표 5. 재료 물성치

재료	탄성계수	항복 응력	밀도
스틸	2.0594×10^8 kN/m ²	325 Mpa	7850 kgf/m ³
케이블	1.8633×10^9 kN/m ²	1600 MPa	7850 kgf/m ³

표 6. 기본 모델의 절점의 좌표 및 설계 변수

절점번호	X-좌표(m)	Y-좌표(m)	설계변수	요소번호
1	0	0.0	1	2,21
2	10	0.0	2	6,18
3	10	-1.0	3	10,14
4	20	0.0	4	5,17
5	20	-2.0	5	9,13
6	30	0.0	6	3,19
7	30	-3.0	7	7,15
8			8	11
9			9	1,4,8,12,16,20

* 11번 부재를 기준으로 Y축 대칭

있다.

앞의 10-BAR 트러스와는 달리 21개의 요소로 이루어져 있기 때문에 설계 변수 증가로 인한 계산 량 및 설계 시간의 증가가 야기될 수 있다. 이에 본 연구에서는 구조물이 좌우대칭인 점을 착안하여 대응되는 요소의 설계 변수를 같다고 가정하여 21개의 설계 변수를 9개로 감소시켜 설계를 수행하였다. 그림 9의 각각의 색들은 부합되는 설계 변수를 의미한다.

앞의 트러스 예제와 마찬가지로 구조물의 총 중량을 목적함수로 설정하였으며 제약조건으로는 허용응력, 좌굴응력 그리고 허용 처짐을 제약조건으로 설정하였다. 허용응력의 경우에는 항복 응력이 케이블과 스틸이 다르기 때문에 부재의 재질에 따라 강관의 허용응력은 490MPa, 케이블의 허용응력은 1600MPa로 달리 제약하였다. 앞의 10-BAR 트러스 예제와는 달리 허용

처짐을 1m 로 제약함으로써 처짐 최적설계를 수행하였다. 또한 보다 실무에 적합한 설계가 가능하도록 한국강구조학회(2009)의 KBC 2009 일반구조용 탄소강 강관의 표준치수를 선택 가능한 단면적에 적용하였으며 제시된 단면2차모멘트 값을 이용하여 좌굴응력을 계산하였다. 좌굴제약이 없는 경우 0.5~500 (cm²)의 범위에서 0.01(cm²)의 간격으로 단면적 후보를 생성하였다.

언더텐션시스템의 단면 최적화를 위한 목적함수 및 제약함수를 다음과 같이 정식화 하였다.

Minimize

$$f(X) = (\sum A_i \cdot l_i) \cdot density \tag{6}$$

Subject to

$$\sigma(i) \leq \begin{matrix} \sigma_{all,steel} \\ \leq \sigma_{all,cable} \end{matrix} \tag{7}$$

$$\sigma(i) \leq \sigma_{cr} \tag{8}$$

$$\delta(i) \leq \delta_{allowable} \tag{9}$$

$$\left(\frac{\sigma(i)}{\sigma_{all}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma(i)}{\sigma_{cr}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\delta(i)}{\delta} - 1\right)^2 \leq 1.0 \tag{10}$$

여기에서,

- A_i : 각 요소의 단면적
- l_i : 각 요소의 길이
- $\sigma(i)$: 각 요소의 응력
- $\sigma_{allowable}$: 허용 응력
- σ_{cr} : 좌굴 응력
- $\delta(j)$: 각 절점의 처짐
- $\delta_{allowable}$: 허용 처짐

을 의미한다.

기본적으로 유전알고리즘은 무제약 최소화(Unconstrained

Optimization) 기법이다. 위에서 유도된 정식화는 제약 최소화(Constrained Optimization) 문제이므로 유전알고리즘의 적용을 위해 정식화된 문제를 벌칙함수(Penalty Function)를 이용하여 식 10와 같이 무제약 최소화 문제로 변환하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \\ & F(X, M) = f(X) \\ & F(X, M) = f(X) + \text{penalty}(X) \end{aligned} \tag{11}$$

식 10의 목적 함수에 가해지는 벌칙 함수는 식 12과 같다.

$$\text{penalty}(X) = r \left\{ \left(\frac{\sigma(i)}{\sigma_{all}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\sigma(i)}{\sigma_{cr}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\delta(i)}{\delta} - 1 \right)^2 \right\} \tag{12}$$

위의 벌칙함수에서 r은 벌칙상수(Penalty Constant)이며, 요구되는 값이 허용 값보다 작은 경우에는 요구 값과 허용 값의 비에 1을 감한 양, 즉 제약의 위배 량에 근거한 벌칙을 목적함수에 추가하며 이로 인해 최소화 문제에서 목적함수가 높은 값을 갖게 된다. 그러므로 유전알고리즘에서의 목적함수를 근거로 평가하는 적합도 값은 반대로 낮은 값을 갖게 된다. 적합도 값이 낮은 개체는 새로운 개체의 생성에 참여할 수 있는 기회가 확률적으로 줄어들게 되므로 제약조건을 위배하는 개체는 다음 세대에서 생존할 확률이 줄어들고 해의 개선은 제약조건을 위배하지 않는 양상으로 진행된다.

5.2 언더텐션 시스템 최적설계 결과

본 연구에서는 프리텐션에 따른 처짐 및 부재응력을 비교하기 위하여 프리텐션을 가하지 않은 0kN에서부터 50kN, 100kN으로 증가시키며 최적 설계를 수행하였다. 또한 좌굴응력에 대한 제약조건이 정상적으로 적용되었음을 확인하기 위해 같은 조건에 좌굴응력의 고려여부에 따라 비교를 하였다. 각각의 설계는 100세대까지 안정적으로 수행 되었으며, 좌굴을 고려한 경우는 약 5분, 그렇지 않은 경우는 약 10분의 시간이 소요되었다. 설계 시간에 차이가 나는 이유는 좌굴을 고려한 경우는 강구조 표준 치수에 제시되어 있는 단면적들만을 후보로 고려한 것에 비하여 좌굴을 고려하지 않은 경우는 단면적 후보의 범위가 제한이 없어 광역의 범위를 검색하였기 때문이다.

5.2.1 프리텐션을 가하지 않은 경우

프리텐션을 가하지 않은 경우의 최적 수렴곡선은 그림 10과 같으며, 최적화 후, 즉 마지막 세대인 100세대에서 계산된 각 설계 변수의 최적단면 결과는 표 7에 제시하였다. 좌굴 제약이 고려된 경우의 최적물량이 그렇지 않은 경우의 물량보다 312.3kg인 14.6%가 증가하였다. 이는 좌굴 제약조건이 있는 모델의 경우

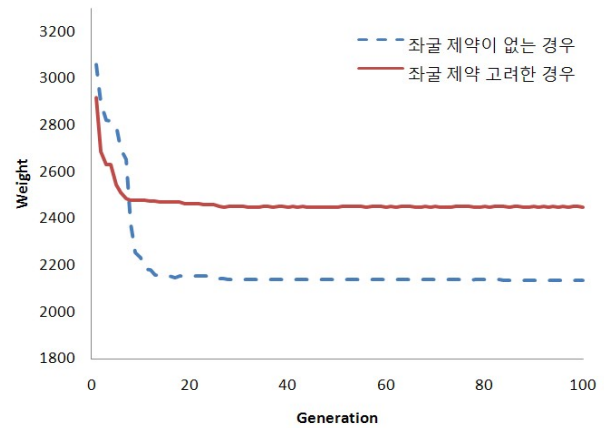


그림 10. 최적 수렴곡선(프리텐션을 가하지 않은 경우)

표 7. 설계 변수에 따른 최적 단면 (프리텐션을 가하지 않은 경우)

설계변수	최적단면(cm ²)	
	좌굴제약이 없는 경우	좌굴제약 고려한 경우
1	0.50	1.24
2	2.00	15.40
3	10.10	9.090
4	13.00	10.69
5	10.60	10.69
6	2.10	2.92
7	3.80	6.47
8	7.70	11.17
9	32.20	34.79
물량(kg)	2137.50	2449.80

실제 강관의 모델을 후보군으로 사용하였기 때문에 최적화시 단면선택에 제약이 있었으며, 좌굴 조건의 추가로 이를 만족하기 위해 부재의 단면적이 증가하였다. 이를 통해 좌굴 제약 조건이 성공적으로 적용되었음을 의미한다.

표 8과 9는 프리텐션을 가하지 않은 경우에 최적화 시의 절점에 따른 처짐, 요소에 따른 응력 그리고 좌굴응력을 각각의 제약 조건으로 나눈, 벌칙함수에 사용되는 값이다. 이 값이 절대값 1에 가까울수록 최적화가 성공적으로 이루어졌음을 의미하며 1이 넘어갈 경우 제약조건 위반 즉, 최적화가 실패했음을 의미한다.

표 8과 9 모두 전반적으로 1에 근접하는 값들이 다수임을 확인할 수 있다. 이는 최적화가 제약조건에 매우 근접하게 이루어졌음을 증명하는 결과이며, 이를 통해 본 프로그램의 신뢰성을 다시 한 번 확인할 수 있다. 좌굴 제약이 있는 경우의 처짐과 응력의 벌칙함수에는 좌굴에 의한 벌칙함수가 추가된다. 인장력을 받는 부재의 경우는 좌굴의 영향을 받지 않기 때문에 NA로 표기하였으며 압축력을 받는 부재만 값을 표기하였다.

표 8. 좌굴 제약이 없는 경우의 처짐과 응력의 벌칙함수

절점	$\delta / \delta_{allowable}$	요소	$\sigma / \sigma_{allowable}$
1	0.00	1	0.98
2	0.99	2	0.99
3	0.91	3	-0.75
4	0.99	4	0.39
5	0.98	5	0.8
6	0.99	6	-0.18
7	0.99	7	-0.81
		8	0.3
		9	0.98
		10	0.97
		11	-0.80

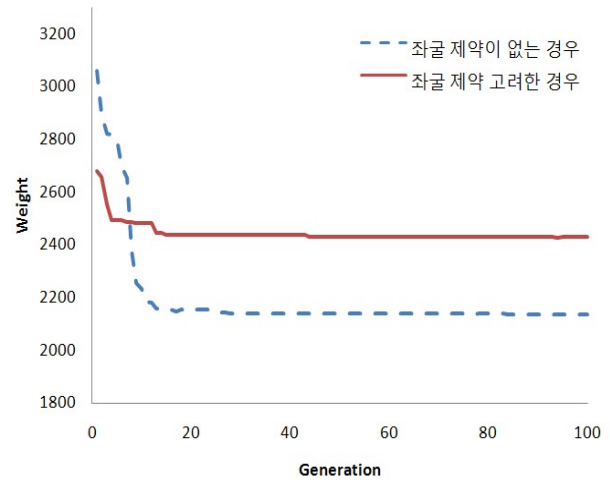


그림 11. 최적 수렴곡선(Pretension=50kN)

표 9. 좌굴 제약을 고려한 경우의 처짐과 응력의 벌칙함수

절점	$\delta / \delta_{allowable}$	요소	$\sigma / \sigma_{allowable}$	σ / σ_{cr}
1	0.00	1	0.92	NA
2	0.88	2	0.75	NA
3	0.89	3	-0.53	0.62
4	0.92	4	0.36	NA
5	0.93	5	0.96	NA
6	0.92	6	-0.07	0.74
7	0.92	7	-0.47	0.67
		8	0.27	NA
		9	0.97	NA
		10	0.99	NA
		11	-0.55	0.77

표 10. 설계 변수에 따른 최적 단면 (Pretension=50kN)

설계변수	최적단면 (cm ²)	
	좌굴제약이 없는 경우	좌굴제약 고려한 경우
1	0.50	1.24
2	1.50	15.40
3	9.50	8.64
4	12.90	9.89
5	12.90	10.69
6	2.10	2.92
7	3.70	6.47
8	6.90	11.17
9	31.00	34.79
물량(kg)	2096.4	2431.1

표 9의 값들은 표 8의 값에 비하여 1에 근접하지 못하는 값들을 보인다. 이는 좌굴을 고려한 경우가 그렇지 않은 경우 보다 단면적 후보군이 간격이 작기 때문이다.

또한 표 8에서는 허용처짐이 허용응력에 비해 1에 가까운 값의 비율이 많으므로 구조물의 최적화시 더 큰 영향력으로 작용하며, 표 9에서는 허용처짐과 허용응력이 좌굴에 대한 제약 조건에 비해 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

5.2.2 프리텐션이 50kN 인 경우

프리텐션을 가하지 않은 경우의 최적 수렴곡선은 그림 11과 같으며, 최적화 후, 즉 마지막 세대인 100세대에서 계산된 각 설계 변수의 최적단면 결과는 표 10에 제시하였다. 좌굴 제약이 고려된 경우의 최적물량이 그렇지 않은 경우의 물량보다 334.7kg인 15.7%가 증가하였다. 이는 좌굴 제약조건이 있는 모델의 경우 실제 강관의 모델을 후보군으로 사용하였기 때문에 최적화시 단면선택에 제약이 있었으며, 좌굴 조건의 추가로 이를 만족하기 위해 부재의 단면적이 증가하였다. 이를 통해 좌굴 제약조건이 성공적으로 적용되었음을 의미한다.

표 11과 12는 프리텐션을 가하지 않은 경우에 최적화 시의 절점에 따른 처짐, 요소에 따른 응력 그리고 좌굴응력을 각각의 제약조건으로 나눈, 벌칙함수에 사용되는 값이다. 이 값이 절대값 1에 가까울수록 최적화가 성공적으로 이루어졌음을 의미하며 1이 넘어갈 경우 제약조건 위반 즉, 최적화가 실패했음을 의미한다.

표 11과 12 모두 전반적으로 1에 근접하는 값들이 다수임을 확인 할 수 있다. 이는 최적화가 제약조건에 매우 근접하게 이루어 졌음을 증명하는 결과이며, 이를 통해 본 프로그램의 신뢰성을 다시 한 번 확인할 수 있다. 좌굴 제약이 있는 경우의 처짐과 응력의 벌칙함수에는 좌굴에 의한 벌칙함수가 추가된다. 인장력을 받는 부재의 경우는 좌굴의 영향을 받지 않기 때문에 NA로 표기하였으며 압축부재만의 값을 표기하였다. 표 11의 값들은 표 12의 값에 비하여 1에 근접하지 못하는 값들을 보인다. 이는 좌굴을 고려한 경우가 그렇지 않은 경우보다

표 11. 좌굴 제약이 없는 경우의 처짐과 응력의 벌칙함수

절점	$\delta / \delta_{allowable}$	요소	$\sigma / \sigma_{allowable}$
1	0.00	1	0.97
2	0.89	2	0.99
3	0.90	3	-0.76
4	0.97	4	0.39
5	0.98	5	0.77
6	0.99	6	-0.23
7	0.99	7	-0.82
		8	0.29
		9	0.79
		10	0.99
		11	-0.88

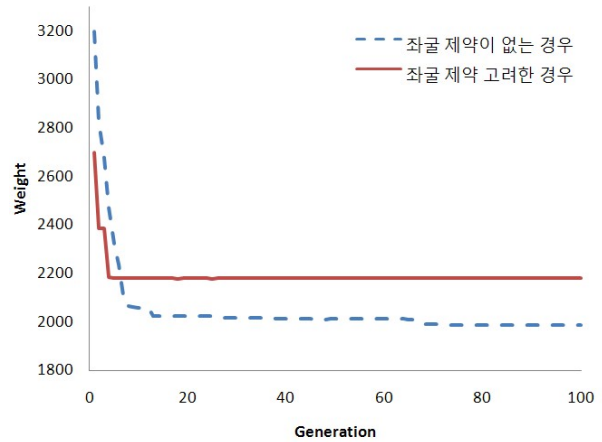


그림 12. 최적 수렴곡선(Pretension=100kN)

표 12. 좌굴 제약을 고려한 경우의 처짐과 응력의 벌칙함수

절점	$\delta / \delta_{allowable}$	요소	$\sigma / \sigma_{allowable}$	σ / σ_{cr}
1	0.00	1	0.88	NA
2	-0.86	2	0.67	NA
3	0.87	3	-0.53	0.62
4	0.89	4	0.35	NA
5	0.89	5	0.99	NA
6	0.88	6	-0.07	0.76
7	0.89	7	-0.47	0.66
		8	0.26	NA
		9	0.96	NA
		10	0.99	NA
		11	-0.54	0.76

표 13. 설계 변수에 따른 최적 단면 (Pretension=100kN)

설계변수	최적단면(cm ²)	
	좌굴제약이 없는 경우	좌굴제약 고려한 경우
1	0.50	1.24
2	1.70	11.17
3	9.00	10.69
4	12.90	10.69
5	10.30	10.69
6	1.70	2.92
7	3.70	6.47
8	6.90	11.17
9	29.70	29.94
물량(kg)	1988.3	2178

단면적 후보의 간격이 작기 때문이다.

또한 표 11에서는 허용처짐이 허용응력에 비해 1에 가까운 값의 비율이 많으므로 더 큰 영향력을 작용하며 표 12에서는 허용처짐과 허용응력이 좌굴에 대한 제약 조건에 비해 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

5.2.3 프리텐션이 100kN 인 경우

프리텐션을 가하지 않은 경우의 최적 수렴곡선은 그림 12과 같으며, 최적화 후, 즉 마지막 세대인 100세대에서 계산된 각 설계 변수의 최적단면 결과는 표 13에 제시하였다. 좌굴 제약이 고려된 경우의 최적물량이 그렇지 않은 경우의 물량보다 190.1kg인 9.6%가 증가하였다. 이는 앞의 예제들과 이유가 동일하며, 좌굴 제약 조건이 성공적으로 적용했음을 확인할 수 있다.

표 14과 15는 프리텐션을 가하지 않은 경우에 최적화 시의 절점에 따른 처짐, 요소에 따른 응력 그리고 좌굴응력을 각각의 제약조건으로 나눈, 벌칙함수에 사용되는 값이다. 이 값이 절대값 1에 가까울수록 최적화가 성공적으로 이루어졌음을 의미하며 1이 넘어갈 경우 제약조건 위반 즉, 최적화가 실패했음을 의미한다.

표 14과 15 모두 전반적으로 1 에 근접하는 값들이 다수임

표 14. 좌굴 제약이 없는 경우의 처짐과 응력의 벌칙함수

절점	$\delta / \delta_{allowable}$	요소	$\sigma / \sigma_{allowable}$
1	0.00	1	0.98
2	0.90	2	0.99
3	0.91	3	-0.99
4	0.99	4	0.40
5	0.99	5	0.74
6	0.99	6	-0.21
7	0.99	7	0.80
		8	0.29
		9	0.98
		10	0.99
		11	-0.87

을 확인 할 수 있다. 이는 최적화가 제약조건에 매우 근접하게 이루어 졌음을 증명하는 결과이며, 이를 통해 본 프로그램의 신뢰성을 다시 한 번 확인할 수 있다. 좌굴 제약이 있는 경우의 처짐과 응력의 벌칙함수에는 좌굴에 의한 벌칙함수가

표 15. 좌굴 제약을 고려한 경우의 처짐과 응력의 벌칙함수

절점	$\delta / \delta_{allowable}$	요소	$\sigma / \sigma_{allowable}$	σ / σ_{cr}
1	0.00	1	0.96	NA
2	0.89	2	0.99	NA
3	0.90	3	-0.49	0.57
4	0.98	4	0.39	NA
5	0.99	5	0.90	NA
6	0.98	6	-0.06	0.99
7	0.99	7	-0.46	0.65
		8	0.29	NA
		9	0.94	NA
		10	0.79	NA
		11	-0.54	0.75

추가된다. 인장력을 받는 부재의 경우는 좌굴의 영향을 받지 않기 때문에 NA로 표기하였으며 압축부재만의 값을 표기하였다. 표 14의 값들은 표 15의 값에 비하여 1에 근접하지 못하는 값들을 보인다. 이는 좌굴을 고려한 경우가 그렇지 않은 경우 보다 단면적 후보의 간격이 작기 때문이다.

프리텐션이 100kN인 경우엔 모두 제약 조건이 고르게 작용하였으며, 앞의 예제들과는 다르게 상부부재와 하부부재 사이에 있는 6번 부재의 경우 좌굴의 제약 조건으로 인해 단면적이 결정됨을 확인하였다.

5.2.4 프리텐션 따른 최적 수렴 곡선의 비교

다음 그림 13와 14은 앞에서 수행한 각각의 프리텐션에 따른 최적 곡선을 비교한 그림이다. 모든 시뮬레이션이 전역 최적 값을 찾고 있으며, 이는 마이크로 유전알고리즘이 언더텐션 시스템의 단면 최적화에 뛰어난 성능을 보이고 있음을 의미한다. 표 16은 각 조건에 따라 모델에 적용한 프리텐션 값에 따른 물량 저감 효과를 나타낸 것으로써 프리텐션이 증가함에 따라 좌굴 제약 조건 유무의 상관없이 언더텐션 시스템의 최적 물량은 확연히 감소하였다. 또한 대부분 허용처짐 및 허용응력으로 인해 단면적이 결정되었지만 100kN의 프리텐션을 가한 경우 좌굴 제약조건으로 단면이 결정되는 것을 확인

표 16. 프리텐션 크기에 따른 물량 저감 효과

프리텐션(kN)	좌굴을 고려하지 않은 경우		좌굴을 고려한 경우	
	물량(kg)	저감율(%)	물량(kg)	저감율(%)
0	2137.5	0	2449.8	0
50	2096.4	1.9	2431.1	0.8
100	1998.3	6.5	2178.0	11.1

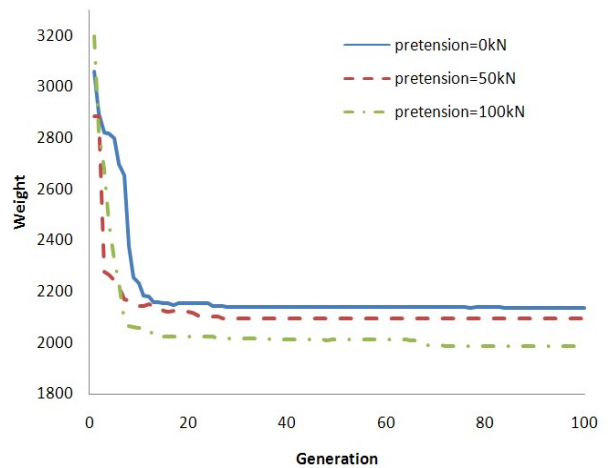


그림 13. 프리텐션에 따른 최적 수렴 곡선 (좌굴을 고려하지 않은 경우)

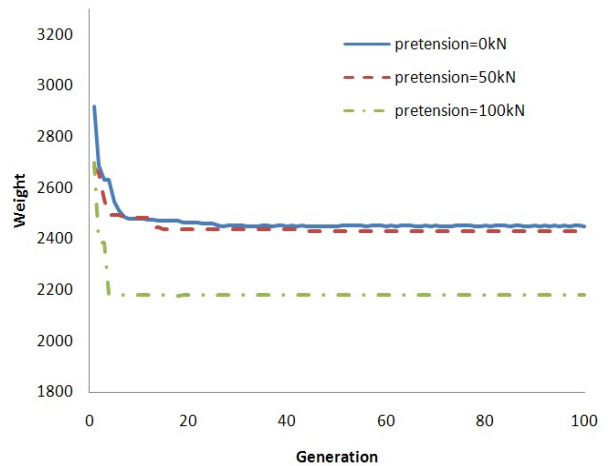


그림 14. 프리텐션에 따른 최적 수렴 곡선 (좌굴을 고려한 경우)

할 수 있었다. 따라서 프리텐션을 통한 구조물의 처짐 및 부재 크기를 제어할 수 있음을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 최적화 기법인 마이크로 유전알고리즘(Micro Genetic Algorithm : μ -GA)을 이용하여 언더텐션 시스템의 최적설계 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 프리텐션을 변수로 좌굴을 고려한 언더텐션 시스템 구조물의 최적 설계를 수행하였다. 이를 바탕으로 결과를 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에서는 마이크로 유전 알고리즘을 이용하여 언더텐션 시스템의 최적 설계 프로그램을 성공적으로 개

발하였다. 본 프로그램을 사용할 경우 여러 조건을 만족하는 언더텐션 시스템의 최적 설계를 간편하고 빠르게 수행 가능할 것이다. 최적 설계를 바탕으로 최소의 물량을 가능케 하는 최적의 단면들을 찾아낼 수 있으므로 경제적이며 효율적인 설계가 가능하다.

- (2) 프리텐션이 증가함에 따라 언더텐션 구조물의 최적 물량은 감소하였다. 따라서 프리텐션을 통한 구조물의 처짐 및 부재 크기를 제어 가능하다.
- (3) KBC 2009의 일반구조용 탄소강 강관의 표준치수를 이용하여 프로그램을 성공적으로 개발하였다. 그 결과 좌굴응력이 고려된 언더텐션 시스템의 최적설계가 가능하였으며, 보다 실무에 적합한 최적설계가 가능하다.
- (4) 추후 주어진 부재 크기에 대해 최적의 프리텐션 값을 결정 가능하며, 비선형을 고려한 장스팬 구조의 언더텐션 시스템의 최적 설계를 검토 중이다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0087819)

참 고 문 헌

강문명, 반춘욱(2002) 퍼지-유전자 알고리즘에 의한 트러스 단면 및 형상 이산화 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 한국전산구조공학회, 제15권, 제1호, pp.81~89.

김봉익, 권중현(2007) 유전자 알고리즘을 이용한 2차원 강구조물의 최적설계, 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 제21권, 제2호, pp.75~80.

김선명, 이재홍(2001) 마이크로 유전알고리즘을 이용한 냉간성형강 부재의 단면 최적설계, 석사학위 논문, 세종대학교.

김여근, 윤복식, 이상복(1999) 메타 휴리스틱, 영지문화사.

김영빈, 이재홍(2003) 마이크로 유전알고리즘을 이용한 I-형 복합재료 보의 최적설계, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 2003년 6월호, pp.69~77.

박덕근, 이진, 함수운, 안남식, 이기학, 이재홍(2008) 언더텐션 시스템을 이용한 장스팬 구조의 처짐 거동 해석, 한국공간구조학회 춘계학술발표회 논문집, 한국공간구조학회, pp.66~694.

진강규(2004) 유전 알고리즘과 그 응용, 교우사.

한국강구조학회(2009) KBC 2009 강구조설계, 구미서관.

황선일, 조홍동, 한상훈(2001) 유전알고리즘을 이용한 트러스 구조물의 이산화최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 한국전산구조공학회, 제14권 제2호, pp.97~106.

Broughon, P. and Ndumbaro, P. (2008) *The analysis of cable and catenary structures*, Thomas Telford.

Goldberg, D.E. (1989) *Genetic Algorithms in search, Optimization and machine Learning*, Addison-Wesley.

Goldberg, D.E. (1989) Sizing populations for serial and parallel genetic algorithms, *Proc. 3rd International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, Arlington, VA, pp.70~79.

Haftka, R.T. and Gurdal, Z. (1992) *Elements of Structural Optimization*.

Hoang, T. and Lee, J.H. (2009) Material and Geometrically Nonlinear Analysis of Tensegrity structures.

Jenkins, W.M. (1991) Structural Optimization with the Genetic Algorithm, *The Structural Engineer*, Vol. 69, No. 24, pp.419~422.

Kaveh, A. (2009) Size optimization of space trusses using big bang-big crunch algorithm, *Computers and Structures*, Vol. 87, No. 17-18, pp.1129~1140.

Kaveh, A. and Kalatjari, V. (2004) Size/geometry optimization of trusses by the force method and genetic algorithm, *ZAMM, Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 84, No. 5, pp. 347~357.

Krishnakumar, K. (1989) Micro-genetic Algorithm for Stationary and Non-stationary Function Optimization, SPIE, *Intelligent Control and Adaptive Systems*, Vol. 1196, pp.282~296.

Levy, R. and Hanaor, A. (1992) Optimal Design Of Prestressed Truss. *Computers & Structures*, Vol. 43, No. 4, pp.741~744.

Motro, R. (2003) *Tensegrity - Structural System for the Future*, London and Sterling.

Wang, B.B. (2004) *Free-standing Tension Structures*.

(접수일자 : 2009. 9. 15 / 심사일 2009. 9. 25 / 게재확정일 2010. 12. 22)