

재료 물성 최적화를 통한 PS 강연선의 형상 단순화에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on the Simplification of the Shape of PS Tendon Through the Optimization of Material Properties

김도연¹, 장일영^{2*}

Do-Yeon Kim¹, Il-Young Jang^{2*}

〈Abstract〉

This paper derives material properties of steel bars that simulate the distribution of stress and strain of prestressed tendons used in Prestressed concrete(PSC) girders and presents an optimal material model. ABAQUS software was used to establish the 3D solid model of the PSC girder and strand wire rope for a PS(Prestressed) tendon. Then the model of steel wire rope was imported into the Isight interface plugin directly through the ABAQUS and the Data Matching. In ABAQUS, the contact pairs were established, the models were meshed, the constraints were applied to solve the finite element model and an axial tension of 0.5m/s was loaded to analyze the stress and deformation distributions in the normal working range of the PS strand wire rope. In Data Matching, classical experimental data is fitted to the optimal material properties through finite element analysis and multi-objective optimization. The results show that the steel bar with optimal material properties presents a similar linear area and stress distribution with the PS tendon.

Keywords : PS Tendon, Material Properties Optimization, Shape Simplification, Finite Element Analysis

1 정회원, 주저자, 국립금오공과대학교, 박사과정

2* 정회원, 교신저자, 국립금오공과대학교, 교수
E-mail: jbond@kumoh.ac.kr

1 Dept. of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

2* Dept. of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

1. 서론

최근 고속도로 교량 건설에 다양한 프리스트레스트 콘크리트 (Prestressed concrete, PSC) 거터 공법이 적용되고 있다. 프리스트레스트 콘크리트 구조는 긴장재와 정착장치를 통해 압축력을 도입하여 콘크리트 구조물의 처짐, 균열 등의 취약성을 줄여 철근콘크리트 구조인 RC 구조(Reinforced concrete structure)에 비해 탄성 회복력이 향상된 구조다. 기존 철근콘크리트(Reinforced concrete) 구조대비 강도 증진, 부재 단면감소, 장경간화가 가능하여 경제적인 시공이 가능하여 널리 사용되고 있다.

PSC 구조는 썸기(Wedge), 쉬스(Sheath), 플레이트(Plate), PS 강연선(PS tendon) 등으로 구성되어 있고, 이 중 PS 강연선은 구조물의 안전성과 사용성을 확보하기 위해 설계 장력을 적절하게 도입하고 유지하는 중요한 요소다. 이러한 PS 강연선을 포함하는 PSC 구조는 성능을 평가하고 거동을 예측하려면 일반적으로 시간과 비용이 많이 들고 노동 집약적인 실험이 필요한데, 최근에는 컴퓨터를 활용한 유한요소 해석(Finite element analysis)을 통해 거동을 평가하는 것이 주요 연구 접근법이 되고 있다.

비선형 유한요소 해석을 위해서는 PSC 구조의 모든 구성요소에 대한 상세한 모델링이 필수적이다. 특히 PS 강연선은 주로 7연선으로 가운데 심선에 6개 측선이 나선형으로 배열되어 있는 형태다. 측선은 전체 강연선이 일체 거동을 할 수 있도록 균등하게 하중을 구속하고 심선은 측선에 의한 구속으로 인장하중을 지지한다.

나선형 구조의 PS 강연선은 비틀린 구조적 형태로 인해 정확하게 모델링하는 것이 어렵다. 곡면으로 인해 요소간 표면이 접촉하면 침투(Interpenetration)를 유발하고 해석 수렴성을 저하시켜 해석 시간에도 영향을 미치므로 해석 효율

성 측면에서 좋지 못하다. 이러한 요소 침투를 막기 위해서는 유한요소를 조밀하게 제작하거나 또는 모델링을 단순화하는 방법이 필요하다.

유한요소를 조밀하게 제작하려면 나선형 모델에 파티션(Partition)을 적용하고 세분화하여 선형 또는 이차 요소로 근사화하는 작업이 필요하다. 하지만 요소의 과도한 조밀성은 하드웨어의 성능에 따라 해석 시간이 기하급수적으로 늘어날 수 있어 주의가 필요하다.

모델링을 단순화하려면 PS 강연선을 원형 강선으로 모델링 할 수 있는데, 이런 단순화된 모델에 PS 강연선의 재료적 특성을 적용하면 정확한 재료적 거동을 얻을 수 없다는 단점이 있다. PS 강연선의 긴장 응력이 곧 PSC 구조물의 성능을 나타내는 것이므로 적절한 형상과 재료 물성을 적용한 시뮬레이션이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 PS 강연선의 형상을 원형 강선의 형상으로 단순화하면서 인장시 동일한 재료적 거동을 모사하고자 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 활용하여 수치해석을 수행하고, 이후 최적화 프로그램인 Isight를 활용하여 PS 강연선의 재료적 거동을 모사할 수 있는 원형 강선의 재료 물성을 제시하고자 한다.

2. 비선형 유한요소 해석

이 장에서는 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 활용하여 PS 강연선과 원형 강선을 모델링 후 인장 해석을 통해 거동을 비교하고자 한다.

2.1 모델링 및 경계조건

재료 물성 최적화 과정에서 재료적 특성, 접촉

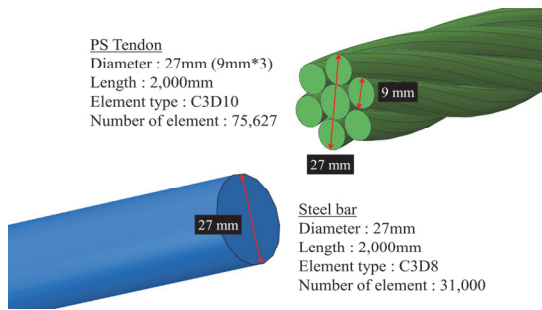


Fig. 1 Geometry of PS tendon and Steel bar

조건, 하중 조건 등을 유한요소 해석을 통해 산정하기 위한 PS 강연선 및 원형 강선의 모델링을 진행하였다.

Fig. 1에서 나타냈듯이 PS 강연선은 직경 9mm의 심선 1개를 직경 9mm의 측선 6개가 나선형으로 감싸고 있는 형태로 전체 직경은 27mm이고, 형상 단순화를 위한 원형 강선의 직경도 27mm로 설정하였다. 전체 길이는 2,000mm로 설정하였다.

PS 강연선의 개별 연선에 대한 접촉 조건은 General Contact를 통해 정의하였고 연선간 마찰계수는 금속의 마찰계수인 0.2를 적용하였다.

PS 강연선과 원형 강선에 대해 인장 해석을 수행하고자 Coupling RP Point를 통해 양단 100mm를 각각 고정을 위한 고정단과 인장을 위한 자유단으로 설정하였고, 해석 중 인장 속도는 0.5m/s로 일정하게 유지하였다.

효율적인 요소 분할을 위해 PS 강연선 모델에는 연속체 3D 10-node의 사면체 메쉬를 적용하였고 원형 강선에는 연속체 3D 8-node의 육면체 메쉬를 적용하였다. 시간에 따른 하중 이력을 관찰하고자 동적 해석인 Dynamic/Explicit solver를 사용하였다[1].

2.2 재료 특성

PS 강연선과 원형 강선에 가정된 재료는 Chueachom,

K., & Sirimontree, S. (2015)의 선행 연구 결과 [2]를 바탕으로 설정하였다. 재료 물성의 탄성 범위는 Table 1과 같다.

Table 1. Elastic material properties

Properties	Value	Remark
Density	7.85E-09 t/mm ³	-
Poission's ratio	0.3	-
Young's Modulus	210,000 MPa	ACI
f_{pu}	1,860 MPa	ASTM Grade 270

PS 강연선의 기계적 거동을 시뮬레이션하기 위해 변형된 Ramberg & Osgood(1943)[3]의 함수에 따라 응력-변형률 관계를 식(1)과 같이 고려하였다.

$$f_p = 200 \times 10^3 \varepsilon_{pf} \left\{ 0.025 + \frac{0.975}{[1 + (118\varepsilon_{pf})^{10}]^{0.1}} \right\} \leq f_{pu} \quad (1)$$

여기서, f_p 는 긴장재의 인장응력, ε_{pf} 는 긴장재의 변형률, f_{pu} 는 긴장재의 설계기준인장강도를 의미한다.

식(1)을 바탕으로 PS 강연선의 응력-변형률을 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 2의 응력-변형률 관계를 바탕으로 선형구간 이후의 항복응력-소성변형률 관계만 취득하여 재료 물성의 소성 범위를 입력하였다.

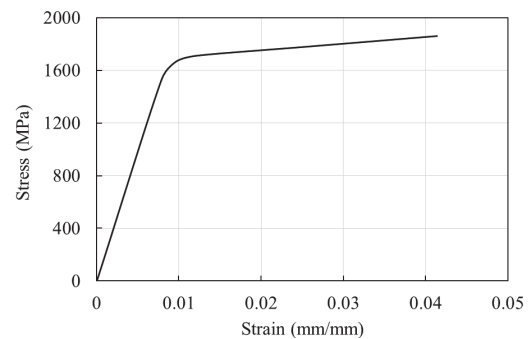


Fig. 2 Stress-strain relation of PS tendon

2.3 비선형 유한요소 해석 결과 및 고찰

동일 지름, 동일 물성치 적용시 PS 강연선과 원형 강선에 500mm/s로 인장 해석을 수행하였을 때 하중-변위 관계는 Fig. 3에 나타내었다.

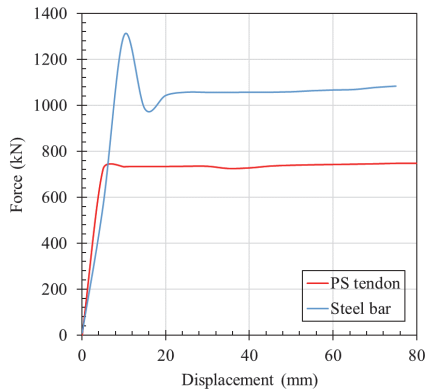


Fig. 3 Force-Displacement relationship

초기 영역의 탄성 거동은 거의 일치하나, PS 강연선은 8mm 인장시 739.613kN의 최대 하중이 발생하였고 원형 강선은 10mm 인장시 1303.32kN의 최대 하중이 발생하여 비슷한 변위에서 약 1.7 배 더 큰 최대 하중의 차이를 보인다. 15mm 이후의 값은 PS 강연선과 원형 강선에 네킹 현상이 발생하여 요소가 비정상적으로 늘어난 부분으로, 이후 재료 물성 최적화에서는 해당 부분을 삭제하고 반복 해석을 수행하였다.

3. 재료 물성 최적화 결과 및 고찰

3.1 최적화 프로세스 및 적용 옵션

본 연구에서는 PS 강연선의 재료적 거동을 모사할 수 있는 원형 강선의 재료 물성을 제안하기

위해 최적화 프로그램인 Isight를 활용하였다. Isight 내 다양한 모듈이 존재하나 본 연구의 재료 물성 최적화에 사용된 모듈은 ABAQUS와 Data Matching이며 최적화 과정은 Fig. 4에 나타내었다.

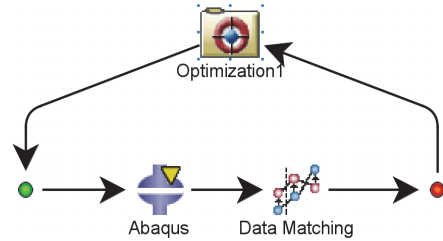


Fig. 4 Optimization workflow in Isight

최적화 모듈인 Optimization에 활용된 알고리즘은 진화 최적화 알고리즘(Evolutionary Optimization Algorithm, Evol)이다. Evol은 Rechenberg, I. (1984)[4]와 Schwefel, H. P. (1975)[5]이 확립한 원칙에 기초한 진화 알고리즘을 나타낸다. 이 알고리즘은 해석 결과가 목적함수에 근접하지 않을 경우 정규 분포에 따라 각 설계 변수에 무작위 값을 추가하여 재해석한다. 이 때 추가되는 무작위의 설계 변수값은 사용자가 설정한 상계 및 하계 범위 내에서 선정된다.

정규 분포의 표준 편차를 특징으로 하는 돌연변이(Mutation)는 진화를 거치며 자체 적용하여 최적화 프로세스 전반에 걸쳐 동적 최적화를 거친다. 이 알고리즘은 제한된 수의 변수와 설계 공간 내의 설계 문제를 효과적으로 해결하는데 주로 사용되므로 정해진 변수 범위 내에서 최적 항복응력-소성변형률을 도출해야 하는 본 연구에 적합하다고 판단하였다.

진화 최적화 알고리즘에서 설계 변수로는 응력-변형률 관계의 소성 구간을 설정하였고, 설계변수의 상계 및 하계 범위는 50%로 설정하였으며 Evol에 기타 설정한 옵션은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Options and values of Evol

Option	Value
Max Evaluations	10 / 50 / 100
Convergence Tolerance	0.01
Minimum Discrete Step	0.02
Parallel Batch Size	5
Max Failed Runs	5
Penalty Multiplier	1000
Penalty Exponent	2

일반적인 최적화의 경우 해석의 반복 횟수(Max Evaluations)가 많아질수록 해석의 결과가 목적함수에 근접해지는 경향을 보인다. 그러나 반복 횟수가 많아지면 최적화 수행 시간 또한 많이 소모되기 때문에 목적함수에 근사하되 해석 시간이 가장 효율적인 반복 횟수를 찾아야 한다. 이를 위해 반복 해석의 횟수를 10회, 50회, 100회로 설정하여 차이점을 파악하고자 하였다.

ABAQUS에서는 수립된 모델을 기반으로 정해진 사이클 수만큼 반복 해석을 수행하는데, 이 때 반복 해석의 기준은 Data Matching에서는 PS 강연선의 하중-변위 관계를 타겟값으로 입력한다. 이후 영역 기반 정합 방법(Sum of the absolute area difference)을 통해 반복 해석의 목적함수를 PS 강연선과 원형 강선간 하중-변위 곡선의 절대면적 차이의 합을 최소화하는 것으로 설정하면, PS 강연선의 거동을 모사하는 항복응력-소성변형률이 도출되어 가장 최적화된 원형 강선의 최적 재료 모델을 도출할 수 있다.

3.2 재료 물성 최적화 결과

Isight를 활용한 최적화 결과, Fig. 5, 6, 7에서 나타냈듯이 영역 기반 정합 방법에 따라 목적함수의 최소값을 찾은 것을 확인할 수 있었다.

목적함수의 최소값은 10회 반복 해석에서는 2

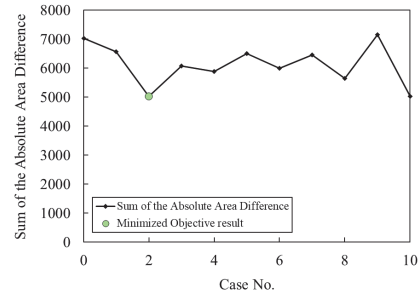


Fig. 5 Optimization - 10 cases analysis

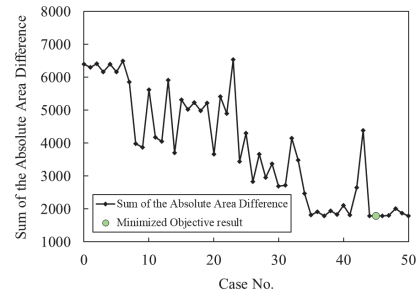


Fig. 6 Optimization - 50 cases analysis

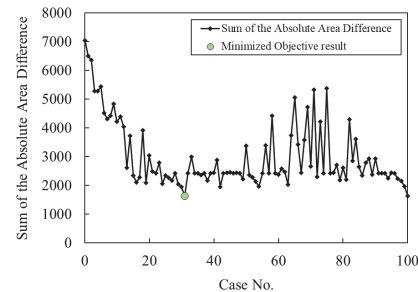


Fig. 7 Optimization - 100 cases analysis

번째 케이스, 50회 반복 해석에서는 31번째 케이스, 100회 반복 해석에서는 45번째 케이스에서 확인되었다. 모두 마지막 반복이 아닌 임의의 반복에 존재하는 경향을 보였는데, 이는 설계 변수가 직전의 해석 결과에 영향을 받지 않고 정규 분포에 따르는 무작위의 값이기 때문으로 판단된다.

비교 결과, 최적 재료 모델 도출에 해석 반복 횟수가 영향을 미칠 수는 있으나, 반복 횟수의 양

이 항상 최상의 최적 재료 모델을 도출하거나 결과값의 정확성을 보장하지는 않는다는 것을 확인하였다. 따라서 설계자가 1회 해석 시간으로 전체 해석의 총 소요 시간을 고려하여 효율적인 반복 횟수를 설정해야 한다.

Fig. 6과 7에서 확인할 수 있듯이 50회 반복

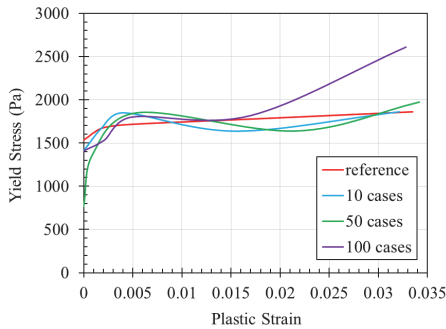


Fig. 8 Optimization process using Isight

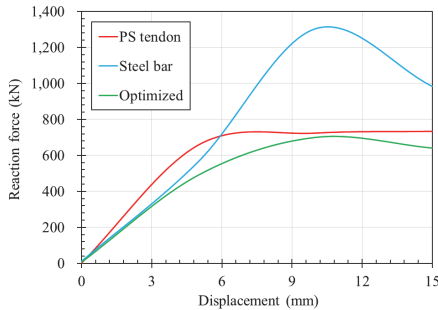


Fig. 9 Optimization process using Isight

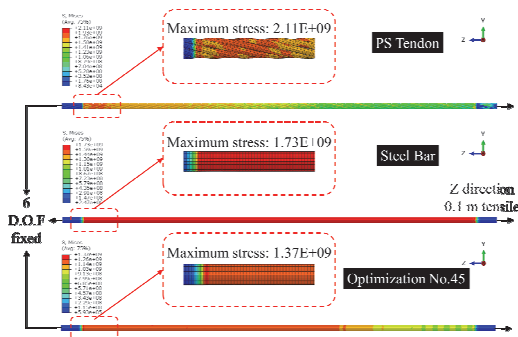


Fig. 10 Optimization process using Isight

해석과 100회 반복 해석에 대해 목적함수의 최소값을 비교하였을 때 그 차이가 10% 이내로 근사한 값을 보였다.

또한 Fig. 8에서는 각 반복 해석에서 목적함수의 최소값을 나타내는 항복응력-소성변형률을 나타내었는데, 100회 반복 해석에서는 항복응력-소성변형률의 곡선이 우상향으로 발산하는 경향을 보여 신뢰도가 떨어진다고 판단하였다. 50회 반복 해석을 최적 반복 횟수로 선정하고 해당 재료 물성을 적용한 해석 결과를 취득하여 결과 분석에 사용하였다.

문헌값을 적용한 PS 강연선과 원형 강선, 최적 재료 모델값을 적용한 원형 강선에 대한 하중-변위 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. 문헌값의 재료 물성을 적용한 PS 강연선은 최대 하중이 732.98kN이고 원형 강선은 1303.32kN의 최대 하중을 보여 약 78%의 차이가 나타났다. 반면 최적 재료 물성을 적용한 원형 강선은 699.5kN의 최대 하중으로 PS 강연선과 약 5%의 차이를 보여 해석 결과의 오차가 73% 감소한 것을 확인할 수 있었다.

각 재료 물성을 적용한 모델에 대한 응력 분포를 Fig. 10에 나타내었으며 상단부터 문헌값을 적용한 PS 강연선과 원형 강선, 최적 재료 모델값을 적용한 원형 강선의 모델이다.

Von. Mises 응력 분포로 확인하였을 때, PS 강연선은 2,110MPa, 원형 강선은 1,730MPa, 최적 재료 모델의 원형 강선은 1,370MPa의 최대 응력을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 PS 강연선의 형상 단순화를 위한 최적 재료 모델 도출 프로세스를 제안하였다. 비선형 유한요소 해석을 통해 동일한 직경과 동일

한 재료 물성을 가지는 PS 강연선과 원형 강선의 하중-변위 관계를 비교하고, 이를 최적화 프로그램에 적용하여 PS 강연선의 하중-변위 관계와 가장 유사한 원형 강선의 최적 재료 모델을 도출하였다.

PS 강연선을 원형 강선의 형태로 형상 단순화하여 모델링함으로써 유한요소 해석상에서 요소간 침투 문제를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 해석의 수렴성, 해석 시간의 효율성, 모델링의 편의성을 확보할 수 있다.

본 연구를 통해 기존에 재료 물성의 최적화를 위해 설계자의 경험과 계산으로 수행했던 과정을 최적화 프로그램을 통해 보정함으로써 재료 물성 최적화에 대한 접근성과 효율성이 향상되었고 PSC 구조에 대한 해석 활용도를 높였다.

본 연구의 프로세스를 통해 PS 강연선의 종류나 형상이 변화해도 재료 물성 최적화를 수행하여 PSC 구조물의 거동에 관한 해석에 적용할 수 있으므로 이를 통해 해석 과정의 효율성과 정확성을 모두 확보할 수 있다는 이점이 있다.

감사의 글

본 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다. (No. NRF-2021R1C1C1013130).

참고문헌

- [1] Park, J.-Y., Ryu, D.-H., You, E.-Z., & Kim, S.-K. (2022). Safety Analysis through Small Car Crash Simulation of Bollard with Square Rounding Sidewalk Block Frame. *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, 25(3), 407-415.
- [2] Chueachom, K., & Sirimontree, S. (2015). Prediction of Flexural and Degradation Behaviors of Full Scale Prestressed Concrete Girder by Finite Element Method. *American Transactions on Engineering and Applied Sciences*, 4(3), 201-212.
- [3] Ramberg, W., & Osgood, W. R. (1943). Description of stress-strain curves by three parameters (No. NACA-TN-902).
- [4] Rechenberg, I. (1984). The evolution strategy. a mathematical model of darwinian evolution. In *Synergetics—From Microscopic to Macroscopic Order: Proceedings of the International Symposium on Synergetics at Berlin, July 4-8, 1983* (pp. 122-132). Springer Berlin Heidelberg.
- [5] Schwefel, H. P. (1975). *Evolutionsstrategie und Numerische Optimierung*. Ph.D. thesis, Verfahrenstechnik TUBerlin.

(접수: 2024.04.23. 수정: 2024.05.08. 게재확정: 2024.05.14.)