

유한요소해석을 통한 다공성 보의 거동 분석

김 현 영¹·김 준 식^{2†}

¹금오공과대학교 기계시스템공학과 대학원생, ²금오공과대학교 기계시스템공학과 교수

Analysis of Porous Beams Through FEM Simulation

Hyun-Young Kim¹ and Jun-Sik Kim^{2†}

¹Graduate Student, Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, 39177, Korea

²Professor, Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, 39177, Korea

Abstract

In this study, various types of porous beams were designed and analyzed to examine the relationship between the behavior of a porous beam and certain nonlocal parameters. The nonlocal parameters were defined as functions of the conditions of defects in the porous material. Finite element analysis was conducted on the beams under typical boundary and loading conditions. Beams with stiffeners having the same dimensions as the defects in the porous beams were also analyzed. The deformation tendency of these beams was determined and described in terms of the nonlocal parameters. The deformation of a porous beam was linearly proportional to the square of the diameters of the defects, whereas that of a beam with a stiffener was linearly proportional to the cube of the diameter of the stiffener. Furthermore, for a stiffened beam with axial loading, the results derived from a 3D solid element and those under 2D plane stress conditions were different.

Keywords : Porous material, FEM, Nonlocal elasticity, Nano beams

1. 서론

최근 자동차, 항공 또는 우주 로켓 등 첨단 운송 산업분야에서 다공성 재료를 이용한 설계가 이루어지고 있다. 그러나 이러한 부재는 기공이 임의적으로 분포하는 특성 때문에 고전 이론으로 해석이 불가능할 뿐만 아니라 유한요소해석 수행에도 어려움이 발생한다. 특히 유한요소해석은 현재 다공성 구조물의 거동 분석을 위한 최선의 방법이지만, 재료 내부의 복잡한 구조를 컴퓨터상에 정확히 구현하여야 하고, 구조 설계 변경이 어려우며 정확한 해석을 위해서는 격자(메쉬)를 매우 조밀하게 짜야 한다는 단점이 있다.

나노단위 구조물은 격자구조(crystal structure)로 인해 연속체역학으로 설명되지 않는 특성을 가진다. 이러한 특성은 균열에 의한 응력집중문제, 다공성 물질 또는 표면장력문제 등에도 발견되고, 이를 크기효과(size effect)라 한다. 크기효과는 해석영역의 거시적 특성길이(external characteristic length, L)

대비 미시적 특성길이(internal characteristic length, l)의 비로 표현되고, $\frac{L}{l} \sim 1$ 인 경우 일반 연속체 개념을 적용하기 어렵다.

크기효과가 발생하는 문제를 원자론적인 접근을 통해 해석할 경우 전산적으로 비효율적이다. 크기효과를 연속체 개념으로 설명하기 위하여 Eringen(1983; 2002), Mindlin(1964; 1965), 그리고 Gurtin과 Murdoch(1975; 1978)이 각각 단순화된 논로컬 이론, 변형률 구배 탄성론(strain gradient elasticity), 그리고 표면 탄성론(surface elasticity)을 제시하였다. 각 이론은 크기효과가 거동의 강성에 주는 영향을 설명한다. Peddieson 등(2003), Wang 등(2006), Reddy(2007), Kim(2014)은 논로컬 이론을 적용한 보 모델을 제시하고, 논로컬 변수에 의해 구조물이 soft해지는 매커니즘을 밝혔다. 반면 Yang 등(2002), Lam 등(2003), Ma 등(2008)은 변형률 구배 탄성론을 적용할 경우 구조물에 stiffening 효과가 발생한다고 주장하였다.

본 논문에서는 임의의 다공성 구조물에 대한 거동 해석의 초석으로, 다양한 형태의 결함을 갖는 다공성 보에 대하여 유

[†]Corresponding author:

Tel: +82-54-478-7397; E-mail: junsik.kim@kumoh.ac.kr

Received April 8 2020; Revised April 21 2020;

Accepted April 22 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.

한요소해석을 진행하고 그 결과를 분석하였다. 다공성 보 설계 시 내부 기공의 분포 형태와 관련되어 보의 거동에 영향을 줄 것으로 예상되는 매개변수를 정의하고, 다양한 크기의 매개변수 값을 갖는 결합을 갖도록 다공성 보를 설계하였다. 유한요소해석 시 보의 경계조건이 거동에 추가적으로 미치는 영향을 관찰하기 위해 다양한 경계조건과 하중 조건을 부여하여 진행하였다. 그리고 해석 결과를 통해 다공성 보의 치짐과 매개변수와의 상관관계를 분석하여 그래프로 정리하였다.

또한, 다공성 보와 동일한 재료의 스티프너(stiffener)를 갖는 보를 설계하고 해석하여 앞선 결과와 비교하였다. 다공성 보의 결합과 같이, 스티프너를 포함하는 보 또한 부재 형상이 균질하지 않아 고전 이론해와 다른 거동을 보인다. 이러한 점에서 스티프너가 구조물에 주는 영향은 재료의 결합과 같이 논로컬 이론으로 설명 가능할 것으로 예상된다. 이에 따라 스티프너를 갖는 보 또한 앞서 설명한 매개변수 값을 다양하게 선정하여 설계하고, 동일한 조건에서 유한요소해석을 수행하여 결과를 분석하였다.

2. 본 론

이 장에서는 보의 결합 또는 스티프너의 형상 및 분포 양상을 나타내는 조건변수를 정의하고, 다양한 조건변수 값을 가지는 보 설계모델을 소개한다. 설계된 보가 갖는 조건변수 값과 유한요소해석 결과를 비교분석하면 결합 보 또는 스티프너 보의 거동을 예측할 수 있는 데이터를 얻을 수 있다.

2.1 논로컬 매개변수

무한히 반복되는 결정격자(crystal structure)를 갖는 나노 구조물은 size effect에 의해 다공성 물질과 대응된다. 다공성 물질에 존재하는 반복되는 결합구조는 나노 구조물에서의 결정격자와 같은 역할을 하며, 따라서 나노 물질이 갖는 구조적 특성이 다공성 물질에서도 나타나게 된다. 나노 구조물에서 부재의 거동에 영향을 주는 특성 길이(characteristic length)는 재료의 결정격자 크기에 비례한다는 것이 알려져 있다. 결정격자에 대응하여, Fig. 1과 같이 다공성 물질에서 유닛 셀(unit cell)을 고려한다. 이 유닛 셀은 중심에 원형 결합이 위치한 정

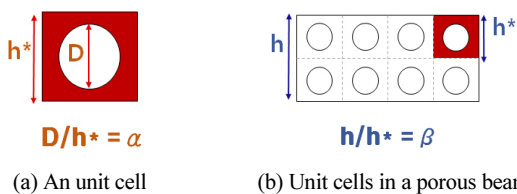


Fig. 1 An unit cell in porous beams and defined parameters

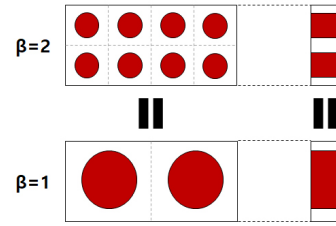


Fig. 2 The total area of the defects are the same regardless of the value of β

사각형 격자이다. 다공성 보는 나노 물질과 같이 유닛 셀이 모여 형성되었다고 생각할 수 있다. 그림 (a)와 같은 유닛 셀이 반복되는 다공성 보 혹은 스티프너가 부착된 보 (b)를 고려하였으며, 이 때 특성 길이는 유닛 셀의 모서리 길이(h^*) 및 결합의 지름(D)이다.

Fig. 1에서 조건변수 α 와 β 는 각 특성 길이를 정규화한 값이다. α 는 유닛 셀의 모서리 길이 대비 결합 혹은 스티프너의 지름 비이다. β 는 보의 두께 대비 유닛 셀의 모서리 길이 비율이다. α 가 클수록 각 결합의 크기가 커진다. β 가 클수록 보에 존재하는 결합의 개수가 많아진다.

α 가 커질수록 부재에 존재하는 결합의 총 면적이 넓어지는 반면, β 의 크기는 부재 내 결합의 총 면적에 영향을 주지 않는다. 즉 α 의 값이 고정된 경우 어떠한 β 의 크기를 가지더라도 보 내부의 총 결합의 넓이가 같다. 보의 단면에 존재하는 결합의 총 넓이 또한 β 의 값에 영향을 받지 않는다. 즉 β 의 값에 관계없이 α 가 동일한 경우 보의 단면 내 결합의 총 넓이는 같다. 스티프너가 부착된 보의 경우에도 동일하다(Fig. 2).

2.2 유한요소해석을 위한 다공성 보 모델

2.1절에서 정의한 조건변수와 보의 변위의 관계를 분석하기 위해 다양한 변수 크기를 가지는 보의 일부를 Fig. 3과 같이 설계하였다. α 의 경우 0.2부터 0.8까지, β 는 1부터 8까지의 값을

$\alpha \backslash \beta$	1	2	3	...	8
0.8				...	
0.7				...	
0.6				...	
⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮
0.2				...	

Fig. 3 Beam configurations for FEM analysis and corresponding parameter values

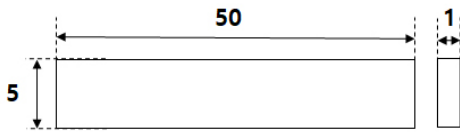


Fig. 4 Geometry of the designed beams

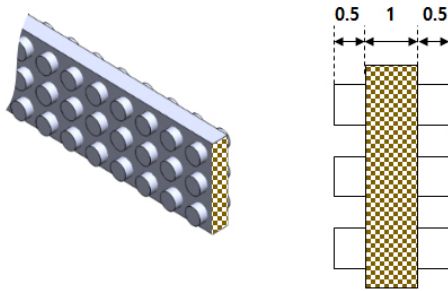


Fig. 5 The dept of stiffeners

갖는 총 56가지 경우의 수를 고려하였으며, 보의 제원은 Fig. 4와 같다. E 는 1000, 포와송 비는 0.3이다. 보가 결함을 가지는 경우 Fig. 3에서 원형으로 표시한 부분이 완전히 관통되며, 스티프너는 Fig. 5와 같이 양쪽 폭 방향으로 부착되었다.

유한요소해석으로부터 구해진 다공성 보의 치짐은 아래와 같이 정규화(normalization)된다.

$$u^*(x) = \frac{u(x)}{u^{EB}(x)} \tag{1}$$

여기서 u 는 결함 혹은 스티프너를 가지는 보의 변위이고, u^{EB} 은 무결함 보에 대한 고전 보이론(Euler-Bernoulli beam theory, E-B 보)의 해이다. 보에 결함 또는 스티프너가 존재하지 않는 경우 $u^*=1$ 이다. 조건변수 α 와 β 에 따른 u^* 의 변화를 관찰함으로써 보의 거동에 각 변수가 주는 영향을 정량적으로 비교할 수 있다.

3. ANSYS 결과

2장에서 설계된 보에 대하여, 다양한 경계조건 및 하중조건을 부여하여 유한요소해석을 진행한다. 해석 결과는 동일 제원의 무결함 E-B 보를 기준으로 정규화된다(식 (1)). 조건변수 α, β 가 해석 결과에 주는 영향을 각 예제별로 비교분석하고, 이로부터 각 조건변수가 보의 강성에 주는 영향을 조사한다.

3.1 축력을 받는 보

이 절에서는 Fig. 3의 concave 및 convex 보에 대하여, 자유단에서 축력을 받는 외팔보의 변위를 조건변수 크기에 따라 정리

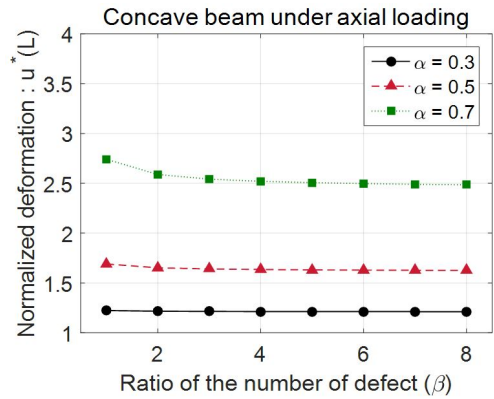


Fig. 6 The normalized displacement(u^*) of concave beam due to the tension in respect of the defect number ratio(β)

하였다. 축력은 자유단의 단면에 균일하게 분포하고, 하중이 작용하는 면은 강체이다. concave 보는 두께방향 평면응력 조건하에 유한요소해석을 진행하였고, convex 보는 3차원 솔리드 요소를 사용하였다. 보의 제원은 Fig. 4와 같고, 보의 결함 또는 스티프너의 지름 및 개수는 Fig. 3과 같이 분포한다. 스티프너의 폭은 Fig. 5와 같이 설계하였다. $E=1000$ Pa, $\nu=0.3$ 이다.

3.1.1 축력을 받는 concave 보

concave 보의 자유단 변위를 결함 개수비 β 에 따라 Fig. 6에 도시하였다. 그래프로부터 변수 α 의 크기가 커질수록 변위가 유선형으로 증가하는 것을 확인할 수 있는데, α 가 증가할수록 각 결함의 지름이 커질 뿐 아니라, 보의 총 결함 넓이도 증가하기 때문이다. 반면, $\alpha \leq 0.5$ 일 때 축변위는 β 의 크기에 관계없이 일정하다. α 가 동일한 보의 경우 β 에 상관없이 단면 넓이는 같다.

$\beta=1, \alpha > 0.5$ 일 때 발생하는 변위의 변화는 응력집중으로 인한 3차원 효과이다. 보에 존재하는 결함의 크기가 클수록 결함 부근에서 발생하는 응력 집중이 축변위에 가시적인 영향을 끼친다. 위 범위 내 조건변수를 가지는 축력 보는 3차원 효과가 지배적이므로, 보 이론으로 근사할 수 없다.

3.1.2 축력을 받는 convex 보

Fig. 7은 축력을 받는 convex 보의 자유단 변위를 스티프너 개수비 β 에 따라 도시한 그래프이다. 스티프너의 지름이 커질수록 보의 축강성에 관여하는 단면 넓이가 증가하고, 스티프너의 지름은 α 에 비례하므로, α 가 커질수록 변위가 줄어든다.

단면 넓이는 스티프너의 개수비 β 에 영향을 받지 않는다. 그림에서 보듯이 β 의 크기가 커짐에 따라 변위가 특정 값으로 수렴하고, α 의 크기가 작을수록 수렴 속도가 빠르다. 이는 3.1.1절과 동일한 결과이지만, 변위의 수렴 구간이 concave 보에 비해 convex 보가 더 좁다. 결함 보에 비하여 스티프너가 부착된 경우 응력집중의 영향이 더 지배적으로 작용함을 알 수 있다. 3차원

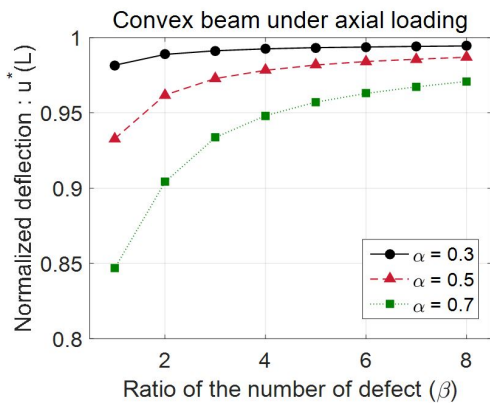


Fig. 7 The normalized displacement(u^*) of convex beam due to the tension in respect of the defect number ratio(β)

효과가 보에 주는 효과 또한 상이하다. concave 보에 응력집중에 작용하는 경우 거동이 soft해지는 반면, convex 보는 stiff해진다.

3.2 굽힘을 받는 보

이 절에서는 자유단에 횡방향 집중하중을 받는 외팔보의 처짐을 유한요소해석으로부터 계산하고, 조건변수 α, β 에 대한 경향성을 조사하였다. 유한요소해석 환경, 보의 물성 및 제원은 3.1절과 동일하며, 자유단 변위 기준으로 분석하였다.

3.2.1 굽힘을 받는 concave 보

결합의 갯수비 β 의 크기에 따른 굽힘 보의 자유단 처짐을 Fig. 8에 나타내었다. 결합의 지름비 α 가 클수록 처짐이 증가한다. 또한 β 의 크기가 증가하면서 처짐이 특정 값으로 수렴한다. 굽힘 보의 강성은 단면의 2차 면적 모멘트 I 에 비례하는데, β 가 증가할수록 I 의 크기 변동이 적다.

한편 β 가 5보다 적을 때 stiffening 효과가 발생하는데, 이는 β 가 작아지면서 I 가 증가하는 동시에 응력집중의 영향이 커지기 때문이다.

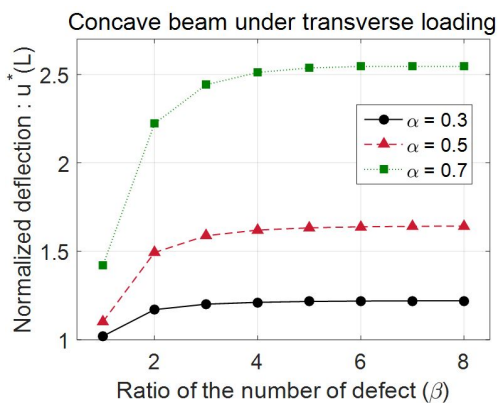


Fig. 8 The normalized displacement(u^*) of concave beam due to the bending in respect of the defect number ratio(β)

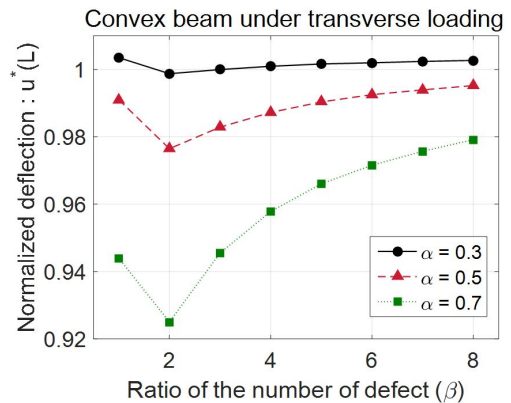


Fig. 9 The normalized displacement(u^*) of convex beam due to the bending in respect of the defect number ratio(β)

3.2.2 굽힘을 받는 convex 보

Fig. 9는 convex 보에 대하여, 스티프너 개수비 β 에 따라 달라지는 자유단의 처짐을 도시한 그래프이다. 3.1.2절의 convex 축력 보와 동일하게, 스티프너 지름비 α 가 커질수록 보의 처짐은 줄어든다. α 가 커질수록 스티프너의 단면 총 면적이 증가하므로, 보는 stiff해진다.

그래프로부터 β 가 커짐에 따라 처짐이 수렴하는 것이 확인된다. 또한 α 의 크기가 작을수록 수렴이 빠르다. 한편, 전반적으로 β 가 커질수록 보가 soft해지는 양상을 보이는 반면 $\beta=2$ 인 지점을 전후로 변위가 증가한다. α 가 동일한 경우, 단면 넓이는 β 의 크기와 관계없이 일정하므로 축강성에 아무런 영향을 주지 않는다. 그러나 굽힘 강성과 관련된 I 는 스티프너와 단면의 도심과의 거리에 비례하므로, α 가 동일할 때 β 값이 커질수록 굽힘 강성이 작아진다. 즉, 변수 β 의 크기는 굽힘 보의 비강성에 반비례한다. 다만 이러한 효과는 α 가 작을수록, β 의 크기가 커질수록 줄어든다. 따라서 β 가 클수록 보의 stiff해지지만, $\beta=1$ 일 때는 낮은 굽힘 강성에 의해 큰 변위를 보인다.

3.3 convex 보의 2D 해석

유한요소해석 시 결합 보의 경우 3차원 유한요소해석과 평면응력조건 하의 해석 결과 간에 차이가 크지 않음을 확인하였다. 반면 스티프너가 부착된 보의 경우 2차원 평면응력 요소를 사용할 경우 결과가 부정확하다. 2차원 요소 및 3차원 유한요소해석으로부터 구해진 축하중 스티프너 보의 자유단 변위를 각각 Fig. 10에 도시하였다. $E=1000, \nu=0.3$ 이고 $\beta=4$ 이다. 그래프로부터 평면응력 조건 여부에 따라 α 의 변화에 따른 축 변위가 달라짐을 알 수 있다. 이는 스티프너를 갖는 보의 경우 평면응력 조건을 부여할 수 없음을 의미한다. 이를 보다 자세히 분석하기 위해 Fig. 11과 같이 단순한 사각 스티프너가 달린 보에 대하여 유한요소해석을 진행하였다. 그림은 사각 스티프너가 달린

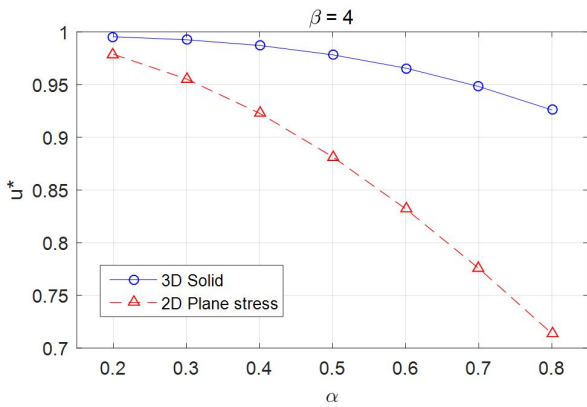


Fig. 10 Results from 2D and 3D analysis of axial beams with stiffener

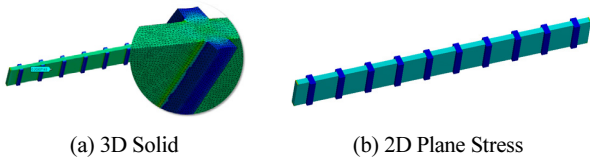


Fig. 11 Normal stress distribution of 3D and 2D plane stress analysis

Table 1 Deformations of the beam with simple rectangular stiffeners via different types of elements

	3D Solid	2D Plane Stress	E-B
Tip deformation(mm)	9.6178	8.9449	9

축력 보의 수직응력 분포를 유한요소해석을 통해 구한 모식도로, 스티프너를 제외한 보의 제원은 Fig. 3과 같은 외팔 축력보이며 자유단에 인장력 1N을 가하였다.

Fig. 11의 왼쪽 그림은 3차원 요소를 사용하여 구해진 수직응력의 분포이고 오른쪽 보는 평면응력조건 하에서 계산된 수직응력의 분포 양상을 나타낸다. 3차원 해석 결과로부터 스티프너와 보 본체의 접합부를 기준으로 응력 분포에 변화가 생기는 것을 알 수 있다. 반면 오른쪽의 2D 해석 결과에서는 폭 방향으로 부여된 평면응력조건에 의해 균일한 응력분포를 보인다.

사각 스티프너가 달린 축력 보의 자유단 변위는 사용한 요소에 따라 Table 1과 같이 구해진다. 표로부터 고전 보 이론(E-B)해와 이차원 평면응력 조건 하의 결과 간의 오차가 미미한 반면, 3D 해석 결과와는 오차가 7%가량 벌어지는 것을 알 수 있다.

위 내용으로부터 스티프너 보와 같이 반복적으로 돌출되는 표면을 가지는 구조물의 경우 단면의 폭 방향으로 응력 분포가 변화하므로 평면응력조건으로부터 정확한 해를 얻을 수 없음이 확인된다.

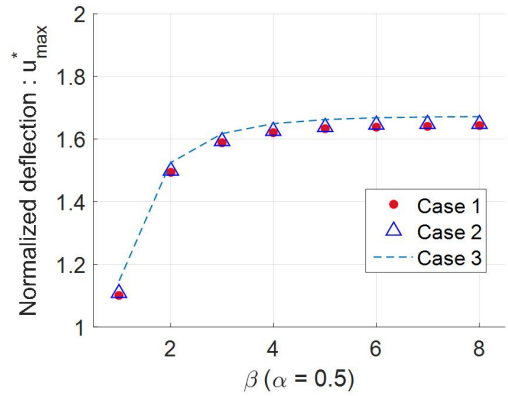


Fig. 12 The normalized displacement (u^*) of concave beam under the various boundary and load conditions in respect of the defect number ratio (β)

Table 2 Boundary and loading conditions of bending beams

	Boundary and loading conditions	Illustration
Case 1	Cantilever with concentrated tip force	
Case 2	Cantilever with uniform distributed load	
Case 3	Simply supported with uniform distributed load	

3.4 경계조건에 따른 굽힘 보의 변위

Fig. 12는 서로 다른 경계조건 및 하중조건을 가지는 굽힘 보의 최대 처짐을 식 1로부터 정규화한 그래프이다. 각 예제 별 보의 종류는 Table 2에 정리하였다. Case 1은 자유단에 집중력을 받는 외팔보, Case 2는 균일 분포하중을 받는 외팔보이고 Case 3은 균일 분포력을 받는 단순지지 보이다.

Fig. 12에서 보이듯 각 case의 u^* 의 크기가 매우 유사하게 나타남을 알 수 있다. 본 연구에서 설계한 보의 경우 각 조건변수에 따른 처짐의 변화가 경계조건 및 하중조건에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 그러나, 복합재료 및 길이가 짧은 보의 경우 경계조건과 하중조건에 영향을 크게 받을 것으로 예상되며, 명확한 분석을 위해 추가적인 보의 설계 및 시뮬레이션 수행이 필요하다.

4. 결론

구조물에 임의로 존재하는 결함 또는 스티프너가 거동에 주는 영향을 조사하기 위하여 결함 또는 스티프너의 지름 및 개

수와 관련된 조건변수를 설정하고, 다양한 변수 크기를 가지는 보 구조물을 설계하였다. 또한, 유한요소해석을 수행하여 조건변수 및 하중 조건에 따른 보 변위의 경향성을 비교분석하였다. 정의한 조건변수는 결함 또는 스티프너의 지름비 α 와 개수비 β 이다. 유한요소해석 결과로부터 다음과 같은 결론이 도출되었다.

축력을 받는 concave 보

- α 가 커질수록 변위 증가
- β 는 변위에 영향 주지 않음(축강성과 관련 없음)
- β 가 커짐에 따라 변위 수렴(β 가 커질수록 stiff해짐)

축력을 받는 convex 보

- α 가 커질수록 변위 감소
- β 는 변위에 영향 주지 않음(축강성과 관련 없음)
- β 가 커짐에 따라 변위 수렴(β 가 커질수록 soft해짐)

굽힘을 받는 concave 보

- α 가 커질수록 변위 증가
- β 는 굽힘 강성에 비례함
- β 가 커짐에 따라 변위 수렴(β 가 커질수록 soft해짐)

굽힘을 받는 convex 보

- α 가 커질수록 변위 감소
- β 는 굽힘 강성에 비례함
- β 가 커짐에 따라 변위 수렴(β 가 커질수록 soft해짐)

한편, 스티프너가 부착된 보와 같이 반복적으로 돌출되는 형상을 가지는 부재는 폭 방향 평면응력 조건을 통한 차원축소가 불가능함을 수치 예제로부터 확인하였다. 반면 결함 보의 경우 평면응력 조건 여부에 관계없이 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

결함 및 스티프너를 가지는 부재의 경우 응력집중에 의하여 수직응력의 구배가 생기는데, 이로부터 발생하는 전단응력을 통하여 논로컬 구조물의 거동을 설명할 수 있다. 이러한 전단응력은 외부의 전단력이 아닌 구조물 특성에 의해 발생한다는 점에서 코저렛(Cosserat) 이론으로 설명 가능할 것으로 예상된다. 향후 코저렛 이론 및 논로컬 이론으로부터 결함 또는 스티프너를 가지는 보의 거동을 설명하는 이론 모델을 제시하고자 한다. 또한 유한요소해석 결과로부터 이론 내의 매개변수의 값을 특정하고, 물리적 의미를 설명하는 것이 향후 연구 과제이다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(2017-104-116)

References

Eringen, A.C. (1983) On Differential Equations of Nonlocal Elasticity and Solutions of Screw Dislocation and Surface Waves, *J. Appl. Phys.*, 54(9), pp.4703~4710.

Eringen, A.C. (2002) Nonlocal Continuum Field Theories, *Springer-Verlag New York, Inc.*

Gurtin, M.E., Murdoch, A.I. (1975) A Continuum Theory of Elastic Material Surfaces, *Arch. Rat. Mech. Anal.*, 57(4), pp.291~323.

Gurtin, M.E., Murdoch, A.I. (1978) Surface Stress in Solids, *Int. J. Solid Struct.*, 14(6), pp.431~440.

Kim, J.-S. (2014) Application of Nonlocal Models to Nano Beams, Part I: Axial Length Scale Effect, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 14(10), pp.7592~7596.

Lam, D.C.C., Yang, F., Chong, A.C.M., Wang, J., Tong, P. (2003) Experiments and Theory in Strain Gradient Elasticity, *J. Mech. Phys. Solid.*, 51(8), pp.1477~1508.

Ma, H.M., Gao, X.-L., Reddy, J.N. (2008) A Microstructure-Dependent Timoshenko Beam Model based on a Modified Couple Stress Theory, *J. Mech. Phys. Solid.*, 56(12), pp.3379~3391.

Mindlin, R.D. (1964) Micro-Structure in Linear Elasticity, *Arch. Rat. Mech. Anal.*, 16(1), pp.51~78.

Mindlin, R.D. (1965) Second Gradient of Strain and Surface-Tension in Linear Elasticity, *Int. J. Solids Struct.*, 1(4), pp.417~438.

Peddieon, J., Buchanan, G.G., McNitt, R.P. (2003) Application of Nonlocal Continuum Models to Nanotechnology, *Int. J. Eng. Sci.*, 41(3), pp.305~312.

Reddy, J.N. (2007) Nonlocal Theories for Bending, Buckling and Vibration of Beams, *Int. J. Eng. Sci.*, 45(2), pp.288~307.

Wang, C.M., Zhang, Y.Y., Ramesh, S.S., Kitipornchai, S. (2006) Buckling Analysis of Micro- and Nano-Rods/Tubes based on Nonlocal Timoshenko Beam Theory, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 39(17), pp.3904~3909.

Yang, F., Chong, A.C.M., Lam, D.C.C., Tong, P. (2002) Couple Stress based Strain Gradient Theory for Elasticity, *Int. J. Solids Struct.*, 39(10), pp.2731~2743.

요 지

본 연구에서는 다공성 보와 논로컬 매개변수 사이의 관계에 대한 유한요소해석을 수행한다. 논로컬 매개변수는 다공성 보의 결함을 표현하는 변수들로 정의하여, 하중조건 및 경계조건에 대한 수치모사를 통해 계산한다. 다공성 보와는 반대 개념의 결함을 가지는 보에 대한 해석도 수행하였다. 이러한 보들의 거동은 논로컬 매개변수의 향으로 표현하였으며, 이 매개변수는 구멍의 지름의 제곱 그리고 원기둥 지름의 세제곱에 비례하는 것을 확인하였다. 특히 작은 원기둥을 가지는 보에 축 하중을 가하는 경우, 예상과는 다르게 3차원 유한요소 해석 결과와 2차원 평면응력 해석 결과는 다를 수 있었다.

핵심용어 : 다공성 재료, 유한요소해석, 논로컬 탄성론, 나노 보