

복합재 실린더의 비틀림 좌굴 특성 연구

이춘우* · 권진희**

Torsional Buckling Behavior of Composite Cylinder

Choon-Woo Lee*, Jin-Hwe Kweon**

Key Words: Torsional Buckling, Composite Cylinder, Failure

Abstract

A nonlinear finite element method is presented to evaluate the torsional buckling moment and failure of composite laminated cylinders. For the progressive failure analysis, the complete unloading method is used based on the maximum stress failure criteria. An arc-length method is incorporated to trace the postbuckling equilibrium path. Present finite element method is verified by the existing experimental and analytical results. The results of the parametric study show that the torsional buckling moments are sensitive to the geometric change, but are not much affected by the lay-up angle. All cylinders tested numerically show the unstable torsional buckling, and therefore the torsional buckling always leads to the catastrophic failure.

1. 서론

항공기 구조물의 경량화 측면에서 복합재의 사용비중이 증가함에 따라 복합재 구조물의 안정성 평가를 위한 좌굴 해석기법 연구 또한 많이 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 좌굴해석 연구가 압축하중을 받는 경우에 치중되어 있으며, 상대적으로 비틀림 좌굴에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 복합재 실린더의 비틀림 좌굴해석을 위한 비선형 유한요소해석 방법을 검토하고, 복합재 실린더의 비틀림 좌굴하중 및 손상해석을 수행한다.

먼저 유한요소 정식화를 위하여는 Updated Lagrangian 방법을 사용하였고, 비선형 평형경로에서의 수치해석을 용이하게 하기 위해 호길이법을 사용하였다. 또한 비틀림 좌굴 후의 실린더의 파손해석을 위해 점진적 강성저하 기법을 도입하였다. 비틀림 좌굴에 대한 여러 인자들의 영향을 고찰하기 위해, 다양한 적층순서와 기하학적 형

상을 가지는 실린더에 대한 좌굴해석 및 파손해석을 수행하였다.

2. 유한요소이론 및 타당성 검토

복합적층 실린더의 비틀림 좌굴해석을 위하여 사용된 요소는 8절점 쉘 요소이고, 절점자유도는 전체 카테산 직교좌표계에서의 변위 u, v, w 와 요소의 국부좌표계에서의 두 개의 회전자유도로 구성된다.

2nd Piola-Kirchhoff 응력 텐서와 Green 변형률 텐서를 사용한 Updated Lagrangian 수식화 기법에 기초하여 유도한 유한요소 방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} ([K_L] + [K_{NL}]) (\Delta U_n) &= -\{\Delta P\} \\ [K_L] &= \int \int \int_{V_n} [B_n^*]^T [D^n] [B_n^*] dV \\ [K_{NL}] &= \int \int \int_{V_n} [B_{NL}^*]^T \{\bar{\sigma}^n\} [B_{NL}^*] dV \\ \{\Delta P\} &= \int \int \int_{V_n} [B_n^*]^T \{\sigma^n\} dV - \{F_n\} \end{aligned} \quad (1)$$

* 한국항공우주산업(주)

** 경상대학교 기계항공공학부

또한 본 연구에서는 증분이론에 의거하여 여러 번의 하중증분과 반복계산을 수행하여 하중-변위

평형경로를 추적하는 방법으로 비선형 유한요소 해석을 수행하였으며 비틀림 좌굴 극점에서 평형 경로상의 극점통과가 가능한 반복계산 방법으로 Fig. 1에 보인 호길이법(arc-length method)을 사용하였다.

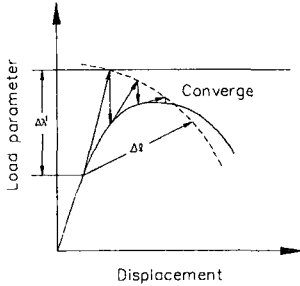


Fig. 1 Arc-length method

본 연구를 통하여 제시된 유한요소 기법의 타당성 검증을 위하여 Herakovich와 Johnson[2]의 실험모델들 중 길이 대 반경의 비(L/r)가 4.39이고 두께가 얇은 [-45/45]s 복합재 실린더와, 길이 대 반경의 비(L/r)가 10.68로 비교적 긴 [0/-45/45/-90]s 복합재 실린더에 대한 해석을 수행하였다. 실험값과 본 해석에 의한 결과 및 기존 해석에 의한 결과를 Table 1에 제시하였다. 좌굴모우드는 Fig. 2에 보인 바와 같다. 제시된 결과로부터 본 연구의 해석결과는 실험값과 비교적 잘 일치하였으며 특히 길이가 긴 실린더의 경우 다른 해석 결과에 비하여 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

Table 1 Torsional buckling load(N-m)

L/r	Test [2]	Previous		Present
		Wu[3]	Huille[4]	
4.39	590.0	640.0 (+8.4%)	657.0 (+11.3%)	522.9 (-11.3%)
10.68	1860	1660 (-10.7%)	1474 (-20.7%)	1806.7 (-2.8%)

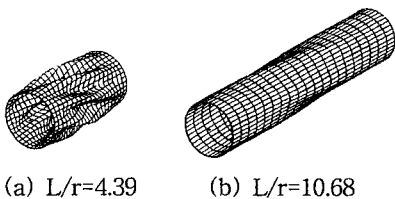


Fig. 2 Torsional buckling mode (Herakovich/Johnson's experimental model)

3. 문제 설명

복합재 실린더의 비틀림 좌굴 및 좌굴 후 거동을 분석하기 위하여 실린더의 형상 변화 및 적층각 변화에 따른 비틀림 좌굴모멘트 및 파손양상을 연구한다. 유한요소모델은 Fig. 3에 보인 바와 같이 실린더 반경방향으로 40개, 길이방향으로 20개의 8절점 쉘요소를 사용하여 구축하였다. 해석에 적용된 경계조건은 양 끝단부위 중 한쪽을 고정지지하여 구속하고, 다른 한쪽은 회전방향 자유도를 제외하고 모두 구속하였다. 하중은 원주방향으로 균일한 비틀림 응력이 작용하도록 하였다.

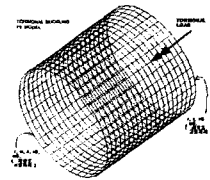


Fig. 3 Finite element model

4. 결과 및 토론

4.1 비틀림 좌굴 거동

Fig. 4는 적층각 [0/90] 복합재 실린더의 비틀림모멘트 대 비틀림각을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 실린더의 좌굴이 발생하기 전에는 비틀림 모멘트와 비틀림각이 거의 선형적이다. 일단 비틀림 좌굴이 발생하면 (load step ⑤) 실린더는 더 이상의 모멘트를 지지하지 못하고, 모멘트가 급격히 떨어지면서 비틀림각은 늘어나는 불안정 좌굴을 보인다. 따라서 좌굴 이후에는 대변형이 발생하게 되는데 Fig. 5와 같이 실린더 중앙에서 원주방향으로 7개의 주름이 나타나는 좌굴모우드가 나타난다. 또한 비틀림 좌굴 이후에는 대변형에 의한 파손현상이 동반되면서 구조물은 최종파손에 이르게 된다.

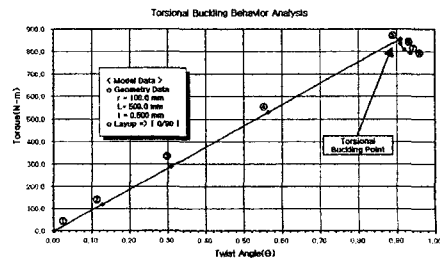


Fig. 4 Buckling torque vs twist angle graph

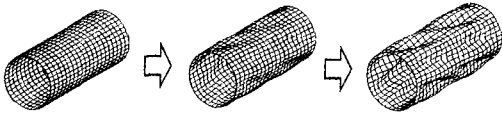


Fig. 5 Twist deformation shapes of cylinder at load step ④, ⑤, ⑧

4.2 길이 대 반경 비 변화의 효과

Fig. 6은 [0/90] 적층 복합재 실린더의 반경(r)을 100.0 mm로 고정하고 길이를 일정비율로 증가시키면서 길이 대 반경 비 변화에 따라 비틀림 모멘트가 어떻게 변하는지를 살펴본 것이다. 그림으로부터 실린더의 길이와 비틀림모멘트는 거의 선형적인 반비례 관계를 가지며, 길이가 증가할수록 비틀림모멘트가 감소하는 것을 알 수 있다. 비틀림 좌굴모드는 Fig. 7에 나타내었다. 실린더의 길이가 짧을수록 즉 비틀림 좌굴모멘트가 클수록 실린더에 발생하는 주름의 수가 많아진다. 좌굴모드의 주름이 많아질수록 고차의 좌굴을 보이는 것으로 볼 수 있으므로 비틀림 좌굴모멘트가 커지는 것은 당연한 것으로 볼 수 있다. 또한 실린더의 길이가 길어질수록 양단 변위 구속의 영향을 받는 영역이 상대적으로 작아지므로 좌굴하중이 낮아지게 됨을 알 수 있다.

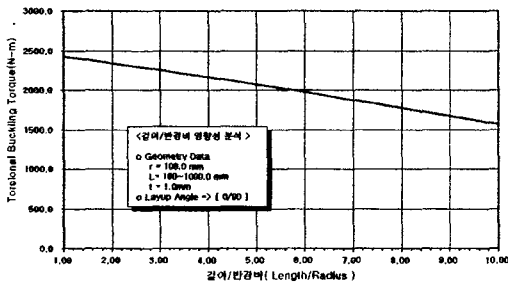
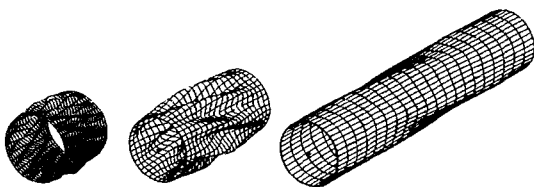


Fig. 6 Effects of length-to-radius ratio



(a) $L/r=2.0$ (b) $L/r=5.0$ (c) $L/r=10.0$
Fig. 7 Torsional buckling mode($t=1.0\text{mm}$)

4.3 실린더 두께 변화의 효과

Figure 8은 실린더의 반경 및 길이를 고정하고 실린더 두께(t)를 변화시켜 비틀림 좌굴모멘트를 살펴본 결과이다. 실린더의 두께를 증가시킬 경우, 길이를 변화시켰을 때와는 달리, 좌굴모멘트가 포물선의 형태로 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 두께가 증가함에 따라 비틀림강성 모멘트 J 의 값이 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 그러나 좌굴모우드에서 나타나는 주름의 수는 8개로서, 실린더의 길이와 반경이 일정할 경우 좌굴모우드는 두께와 관계없이 일정함을 알 수 있다.

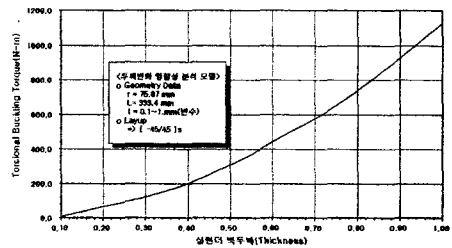


Fig. 8. Buckling torque vs. length/radius ratio

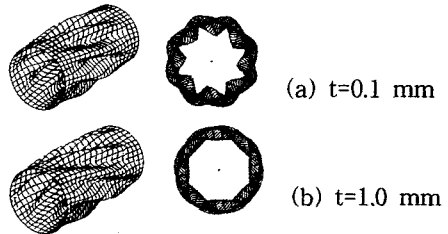


Fig. 9. Torsional buckling modes
($L=333.4 \text{ mm}$, $r=75.87 \text{ mm}$)

4.4 적층각 변화의 효과

실린더의 적층각도 변화가 비틀림 좌굴모멘트에 미치는 영향을 살펴보기 위해 반경 $r=75.62 \text{ mm}$, 길이 $L=482.6 \text{ mm}$, 두께 $t=0.66 \text{ mm}$ 형상의 [0]₄, [20]₄, [60]₄, [90]₄ 적층 실린더에 대한 비틀림 좌굴해석을 수행하였다. 복합재 적층 구조물이 일반적으로 적층순서나 적층각에 따라 매우 다른 기계적 특성을 보이는 것과는 달리, 비틀림 좌굴모멘트의 경우 적층각도에 무관하게 2~4 % 이내의 편차를 보였다. 이것은 순수 비틀림모멘트에 의한 응력은 순수한 전단응력만을 실린더에 가하기 때문에 복합재료의 적층각도와는 무관하게 재료자체의 전단강성에만 영향을 받기 때문으로

로 판단된다. 그러나 실제 구조물의 경우 부분적으로 굽힘하중이나 축하중을 같이 받기 때문에 비틀림 좌굴모멘트만을 기준으로 설계하는 것은 위험할 수 있다. 비틀림 좌굴모멘트와는 달리 비틀림 좌굴모우드의 경우, Fig. 10에 보인 바와 같이, 0도 적층은 11개, 20도 적층은 8개, 60도와 90도 적층 실린더의 경우에는 9개의 주름을 가지는 차이를 나타낸다.

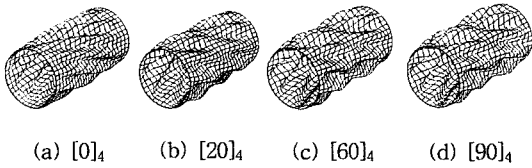


Fig 10. Torsional buckling modes

4.5 비틀림 좌굴 파손해석

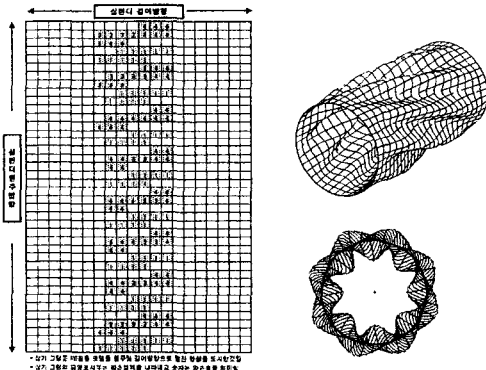


Fig11. Failure of $[\pm 45]_s$ composite cylinder
($L=333.4$ mm, $r=75.87$ mm, $t=0.66$ mm)

Figure 11은 Herakovich 와 Johnson 실험 모델[2] 중 $[\pm 45]_s$ 복합재 적층 실린더의 비틀림 좌굴 극점 통과 후의 파손양상을 원통을 펼친 그림으로 나타낸 것이다. 파손은 최대응력판정식을 사용하여 요소별 각 단층의 평균응력을 사용하여 판정하였다. 비틀림 좌굴 후에 발생하는 파손은 실린더 주름의 꼭지점과 골에서 최외층 및 최내층에서 발생한다. 파손의 형태는 주로 인장에 의한 기지파손이고 섬유방향의 파손이나 전단 파손은 나타나지 않았다. 이것은 좌굴이 발생하면서 주름이 형성되고 이에 따라 실린더가 원주 방향으로 굽힘응력을 받게 되어 나타나는 현상이다. Figure 11에 제시된 파손양상을 보면 실린더의 중앙부에서 주름의 정점과 골을 따라 주기적

으로 총16번의 파손이 발생함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기하학적 대변형과 점진적 강성 저하를 고려한 유한요소법을 사용하여 복합재 실린더의 비틀림 좌굴 및 좌굴 후 거동을 해석하였다. 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 비틀림모멘트를 받는 복합재 실린더는 좌굴이 발생하기까지는 선형적인 변형을 보이다가, 좌굴이 발생하면 급격한 대변형과 비틀림모멘트 감소를 동반하는 불안정 좌굴을 보인다.
2. 비틀림 좌굴모멘트는 실린더 길이에 선형적으로 반비례하고, 두께에는 포물선의 형태로 비례한다.
3. 형상이 동일할 경우 적층각도는 비틀림 좌굴모멘트에 거의 영향을 미치지 못하지만 좌굴모우드는 적층각도에 따라 다르게 나타난다.
4. 비틀림좌굴에 의한 파손은 좌굴로 인해 형성된 주름의 정점과 골에서 굽힘응력에 의해 기지균열의 형태로 발생하여 최종파손에 도달한다.

참고문헌

1. J. H. Kweon, C. S. Hong, and I. C. Lee, "Postbuckling compressive strength of graphite/epoxy laminated cylindrical panels Loaded in Compression," *AIAA Journal*, Vol.33, No.2, 1995, pp.217-222.
2. C. T. Herakovich and Johnson " Buckling of composite cylinders under combined compression and torsion," *Composite ASTM STP 734* ,1981, pp.341-360
3. C. H. Wu, " Buckling of anisotropic circular shells ", *Ph.D. Dissertation, Case Western Reserve Univ. Cleveland, OH.* 1971,
4. A. Huille , C. Yang, and S.-S. Pang, " Buckling analysis of thick-walled composite pipe under torsion," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.119, 1997, pp.111-121.
5. Dongyao Tan, "Torsional buckling analysis of shells of revolution," *International Journal of Solids and Structure*, Vol.37, 2000, pp 3055-3078.
6. H. C. Park, and Y. C. Choi "Torsional buckling analysis of composite cylinder", *AIAA Journal*, Vol.39 , No.5, 2001, pp. 951-955