

# 등분포 하중 작용시 적층각 변화에 따른 원통형 적층구조물의 좌굴 Buckling of Laminated Cylindrical Composite Structures Subjected to Ply Angle Change Under External Uniform Pressure

나태수\* · 염웅준\*\* · 한택희\*\*\* · 강영중\*\*\*\*

Na, Tae Soo · Yeom, Eung Jun · Han, Taek Hee · Kang, Young Jong

## ABSTRACT

The material such as steel or concrete has used to civil structures such as drainage pipes , but many problems such as corrosion in using steel and concrete pipes have happened. So, Necessity of developing new materials with high strength and anti-corrosion has been topic recently. One of this topics is study about FRP pipe. The strength of orthotropic FRP tends to be higher than it of isotropic FRP, the buckling problems can be significant in materials with high strength. thus, the study about buckling of orthotropic FRP-pipe is needed. In this study, buckling analysis of laminated cylindrical composite structures subjected to ply angle change under external uniform pressure was performed.

## 1. 서 론

재료의 중량이 줄어들고 강도가 고강도화 됨에 따라 구조물은 더욱 얇은 박판구조로 설계-시공되며, 이에 따라 구조물의 좌굴 문제가 더욱 중요하게 된다. 본 연구에서도 사용된 관로가 고강도 재료인 FRP(Fiber Reinforced Plastic)를 사용하는 압축력이 지배 인자로 작용하는 구조물이기 때문에 좌굴 문제가 중요하게 된다. 이러한 관로 구조물에 대하여, 이방성 FRP는 등방성인 강관보다 무게비 강성이 크기 때문에 동일한 무게의 관 이라면 강관보다도 좌굴강도가 훨씬 강하므로, 등방성 원형강관보다 더욱 경제적인 구조 형태라고 할 수 있다. 이방성 FRP는 좌굴이 지배적 설계요소로 고강도 재료 구조물에 그 사용성이 나날이 늘고 있는 추세이다. 따라서, FRP를 이용한 지중 관로는 재료적으로 신소재를 사용함으로써 강도를 증진시킬 수 있지만 구조적으로 좌 굴에 대한 안정성을 확보해야하는 구조물이라 할 수 있다. FRP의 장점에도 불구하고 FRP 구조는 국내외적으로 실제적이고 구체적인 연구가 전반적으로 부족한 실정이다. 따라서 FRP의 장점이 여러 가지 연구를 통하여 입증되고 있는 현 시점에서, FRP의 좌굴거동에 대한 연구가 수행된다면 시공성과 경제성, 안정성의 모든 면에서 매우 큰 의미가 있으며, 관로뿐 아니라 FRP 재료를 보다 폭넓은 건설재료로 사용하는 데 이바지할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 좌굴거동에 영향을 미치는 영향 인자들 중에서도 지배적인자 즉, 섬유유 적층각 및 t/D를 고려하여 섬유보강 복합관에 미치는 정성적, 정량적 영향을 고려하고자 한다.

지중매설관의 연구동향을 살펴보면 지중에 묻히는 매설관은 그 형태와 규모면에서 시대의 환경적 변화와 사회적 요구에 의해 나날이 발전을 거듭해 왔으며, 이용분야 또한 다양해지고 있는 실정이다. 그러나 지난 수십

\* 현대건설 주식회사 사원 · 공학석사 · sanjuc1@hotmail.com

\*\* 정희원 · 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 · 공학석사 · tiger56@korea.ac.kr -발표자

\*\*\* 정희원 · 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 · 공학석사 · taekie@korea.ac.kr

\*\*\*\* 정희원 · 고려대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 · yjkang@korea.ac.kr

년 동안 Marston(1930), Watkins(1933), Spangle(1948) 등 이에 관련된 연구는 몇몇 연구자들에 의해 수행되었을 뿐이며, 특히 국내에서의 연구수행은 극히 미미한 실정이다. 외국의 경우 FRP의 연구동향을 살펴보면 1975년에 Tennyson RC는 적층복합관의 압축실험을 수행했고, 1985년에 Simites GJ et al.은 실험과 수치해석과의 관계에 대한 연구를 수행했다. 최근들어 2000년에 Pivush K.Dutta는 온도에 따른 Creep Rupture에 관한 실험을 했고 Yu.M.Tarnopol'skii는 GFRP Textile의 전단강도 측정 실험을 했다. 이처럼 외국의 경우는 섬유보강 복합관의(축방향 압축) 연구가 많이 행해지고 있지만 등분포 압축력을 받는 경우에 대한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 섬유보강 복합관의 좌굴거동에 영향을 미치는 변수들 중에서 지배적인 인자인 섬유의 적층각 및  $t/D$ (두께/직경비)를 매개변수로 하여 등분포 압축력을 받는 섬유보강 복합관의 좌굴 특성을 파악하고자 한다.

## 2. 유한요소 해석 및 변수결정

FRP는 섬유의 배열 및 섬유의 두께/직경비의 영향으로 좌굴특성이 달라지고 또한 원주방향 강성 및 길이방향 강성이 좌굴에 영향을 받는 구조물이다. 복합재료는 원하는 방향으로 강성을 조절할 수 있다는 장점이 있기 때문에 강성비에 대한 변수들이 많아지므로 가장 일반적으로 많이 사용되는 3가지 종류의 복합재료로 강성비에 대한 한정을 하고 적층수도 여러 가지가 나올 수 있지만 우선은 두개의 섬유판으로 적층된 복합관에 대해서 좌굴특성을 파악하고자 한다.

본 연구에서는 유한요소해석에 사용한 Element는 Semiloof Curved Thin Shell(QSL8) 8절점 요소를 사용하였다. 4절점 직선 요소에 비해서 8절점 곡선요소가 섬유강화 복합관을 좀 더 자세히 묘사하기 때문이다. 탄성계수 (Modulus of Elasticity)는 원주방향으로 강성값이 큰 값을 사용하였고 길이방향으로는 원주방향에 비해 작은 강성값을 사용하였다. 등방성관인 경우에는 단면2차모멘트는 일반적인 휨에서 사용하는 길이방향에 대한 것이 아니라, 원주방향의 단면2차모멘트를 사용한다. 그러므로 길이방향의 휨강성이 아니라 원주방향휨강성 (Circumferential bending rigidity)에 의해 좌굴강도가 결정되는 것을 알 수 있다. 그러나 원주방향과 길이방향의 강성값이 다른 비등방성 섬유강화 복합관의 경우에는 등방성관처럼 원주방향 휨강성만이 좌굴강도에 영향을 미치지 않는 원주방향과 길이방향의 강성값의 비가 차이가 클수록 길이방향의 영향도 미침을 알 수 있다. 이러한 조건을 가지고 해석은 범용구조해석 프로그램인 LUSAS(Version13.4)을 사용하였다.

### 2.1 FRP의 해석 모델 제원

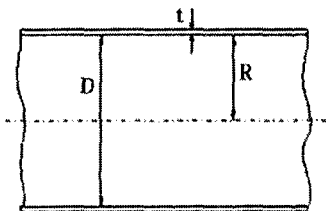


그림 1. FRP의 횡단면 형상

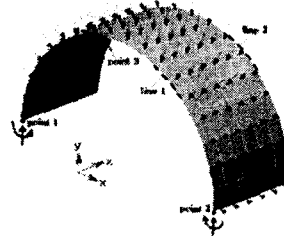


그림 2. FRP의 하중,경계조건

하중조건은 면에 수직으로 등분포하중을 가하였고, 모델을 절반만 봤을 때 경계조건은 Point1, Point2 에서는 Timoshenko가 제시한  $y$ 방향으로는 변위를 구속하고, 기울기가 0인 경계조건과 일치하게 구속하였다. Line1,2는

강관이 무한히 길다고 가정하므로 길이방향의 변위는 생기지 않는다는 가정을 만족시키기 위해서 z방향 변위를 구속하였다. point3는 강관의 일체거동(Rigid Body Motion)을 막기 위해서 x방향 변위를 구속하였다.

표 1. 유한요소해석에 사용된 재료

Type	Material	E1	E2	G12	G13	G23	$\nu_{12}$
A	Gl.-Ep	38.6	8.27	4.14	4.14	3.45	0.26
B	Gr.-Po	155.0	12.10	4.40	4.40	3.20	0.248
C	Gr.-Ep	138	9.00	6.90	6.90	6.21	0.30

A: Gl.-Ep = glass-epoxy B: Gr.-Po = graphite-polymer C: Gr.-Ep = graphite-epoxy

섬유의 적층 방법은 구조해석 방법에 따라 첫 번째는 원주방향으로 1 Layer를 고정시키고 2 Layer는 각도 변화를 주면서 구조 해석을 하였고, 두 번째는 1-2 Layer를 동시에 각도 변화를 시켜 구조 해석을 수행하였다.

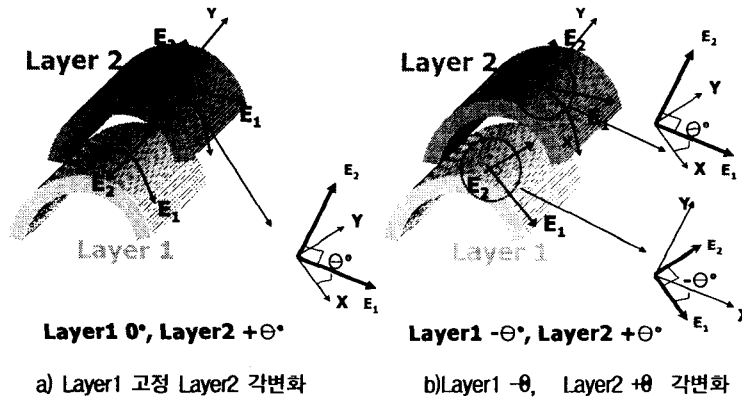


그림 3. 섬유의 적층방법

## 2.2 FRP의 해석 모델 수렴도 분석

현재 등분포하중을 받는 등방성 원형강관에 대한 좌굴해석에 대한 정해는 Timoshenko에 의해 연구되었다. 또한 등분포하중을 받는 등방성 Circular Arch에 대한 좌굴해석에 대한 정해는 다른 여러 연구자들에 의해서도 연구되어졌다. 그러나 이방성 섬유보강 복합관에 등방성 Circular Arch 좌굴식을 그대로 적용하기에는 무리가 있다고 생각이 든다. 이것은 적층각이 달라지면서 좌굴압력을 비교해보면 선행 연구자들에 의해 구한 면내 좌굴식의 좌굴압력과 차이가 현저하게 나타남으로써 알 수 있고 좌굴모드를 비교해 봄으로써도 알 수 있다. 이에 대한 선행과정으로 적절한 모델을 선정하여 수렴도 검증을 수행하고자 한다.

유한요소해석의 결과값은 해석 모델의 요소 개수에 따라 상당한 차이를 보인다. 따라서 정해를 알고 있는 모델에 대하여 유한요소의 개수별 해석치의 비교를 통하여 적당한 유한요소의 개수를 결정하는 것이 타당하다. 원형강관이나 섬유보강 복합관 모두 곡선으로 이루어져 있기 때문에 직선요소(QSL8)로 곡선의 거동을 충분히 표현하기 위해서는 충분한 자유도를 갖도록 많은 요소를 사용하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 요소의 수에 따른 해석결과의 수렴도를 검토하였다. 섬유보강 복합관의 원주방향에 대해 해석모델은  $D=200\text{mm}$ ,  $t=6.0\text{mm}$ 인 모델을 사용하였고 길이방향에 대한 수렴도는 Graphite-Polymer를 대표로 나타내었다.

표 2. FRP의 원주방향 수렴도

Element Number	Eigenvalue	Error ratio
16	4.34302	-
32	4.23669	2.510
64	4.23386	0.067
128	4.23315	0.017

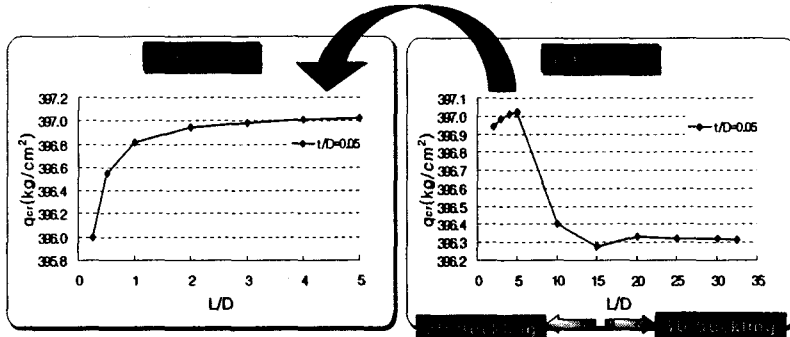


그림 4. FRP의 길이방향 수렴도

섬유보강 복합관에 대해 원주방향과 길이방향에 대하여 수렴도를 검증해 보았다. 원주방향으로는 element 수를 16개부터 128개 까지 나누어서 해석을 수행한 결과 element 가 64개 이상이면 수렴하는 것으로 판단된다. 길이방향으로는 Layer1과 Layer2를 원주방향으로(0도) 고정시킨 후 L/D를 1부터 32.5까지 해석을 수행한 결과 L/D가 7.5까지 아래 그림과 같이 2차원 좌굴모드를 가짐을 알 수 있었다. 그러나 L/D의 비가 10이상부터는 좌굴 모드가 2차원이 아닌 3차원의 형태를 나타냄을 알 수 있었다. 유한요소해석에 사용된 A,B,C Type 모든 경우에 대해서 일정한 경향을 나타냈다. 유한요소해석을 수행한 좌굴 모드를 비교해 보면 아래 그림과 같다. 2D 좌굴 모드는 길이방향에 대해 단면 형태가 일정한 형태를 나타내지만 3D 좌굴 모드를 살펴보면 길이방향에 대해서도 변형이 일어남을 알 수 있다. 3D 좌굴 모드는 길이 방향의 강성이 원주방향의 강성과 마찬가지로 줄어들기 때문에 일어나는데 좌굴 모드가 고차로 갈수록 좌굴유효길이가 점점 짧아짐을 알 수 있다. 위 그림에서도 알 수 있듯이 2D와 3D 좌굴압력값의 차이가 크지 않는데 이것은 원주방향강성과 길이방향강성의 비가 그리 크지 않은 재료이기 때문이다. 만약 원주방향과 길이방향강성비가 크다면 2D와 3D 좌굴압력값의 차이가 상당한 차이가 남을 알 수 있다.



그림 5. FRP의 2D 좌굴모드



그림 6. FRP의 3D 좌굴모드

### 3. 해석 결과

본 연구에서는 섬유보강 복합관의 좌굴거동에 영향을 미치는 변수들을 변화시켜가면서 구조해석을 수행하였다. 우선 좌굴응력에 영향을 미치는 변수로 강성비, 두께, 직경, 적층각이 있는데 강성비는 재료를 3가지로 한정시킴으로써 줄일 수 있고 두께와 직경은 두께/직경비( $t/D$ )로 나타냄으로써 줄일 수 있다. 따라서 각 재료별로  $t/D$ 를 변화시키면서 각각에 대해 적층각을 변화시켜가면서 좌굴압력의 변화를 정성적, 정량적으로 알아보았다. 우선은 첫 번째로 Layer1은 원주방향으로(0도) 고정을 시키고 Layer2를 각도변화를 시켜가면서 구조 해석을 수행하고 두 번째로 Layer1과 Layer2를 동시에 같은 각도만큼을 반대로(- $\theta$ , + $\theta$ ) 변화시켜가면서 구조 해석을 수행하였다

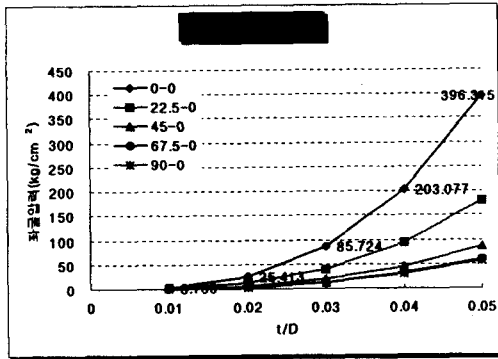


그림 7. Gr-Po 적층각을 고려한  $t/D$ 별 좌굴압력 (Layer1(0도)고정-Layer2 각변화)

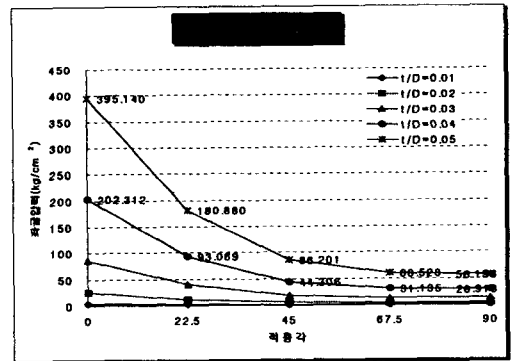


그림 8. Gr-Po  $t/D$ 를 고려한 적층각별 좌굴압력 (Layer1(0도)고정-Layer2 각변화)

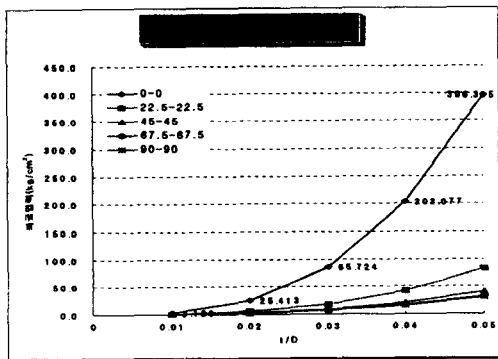


그림 9. Gr-Po 적층각을 고려한  $t/D$ 별 좌굴압력 (Layer1 각변화(- $\theta$ )-Layer2(+ $\theta$ ) 각변화)

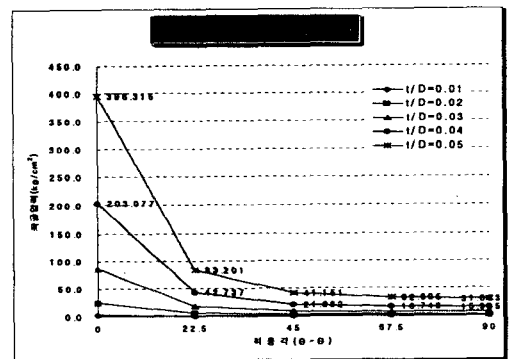


그림 10. Gr-Po  $t/D$ 를 고려한 적층각별 좌굴압력 (Layer1 각변화(- $\theta$ )-Layer2(+ $\theta$ ) 각변화)

위 그림 7과 그림 9에서 알 수 있듯이 각각의 적층각별  $t/D$ 의 비율이 증가할수록 좌굴압력값이 커짐을 알 수 있다. 즉 섬유보강 복합관의 직경이 일정하다면 관의 두께가 커질수록, 두께가 일정하다면 관의 직경이 작아질수록 좌굴응력이 커짐을 알 수 있다. 또한 위 그림 8과 그림 10에서 알 수 있는 것은 적층각의 변화에 따른 좌굴응력의 변화인데 Layer1을 고정시키고 Layer2만 각변화를 시켰을 경우보다 Layer1은 - $\theta$  만큼 각변화하고 Layer2는 + $\theta$  각변화 했을 경우가 좌굴에 대해 민감함을 알 수 있다. 이렇게 각변화에 따른 좌굴압력의 감소가 나타나는 것은 원주방향의 섬유강성이 섬유보강 복합관의 좌굴 성능에 지배적인 역할을 하기 때문이라고 판단된다. Graphite-Polymer와 마찬가지로 Glass-Epoxy Graphite-Epoxy도 같은 경향을 나타냈다. 적층각의 경우

Layer1은 고정시키고 Layer2만 각도변화를 시켜서 구조 해석을 수행했는데 축변화를 이용하여 이론값과의 비교 종합해보면 다음과 같다.

등가의 강성값을 얻기 위해서는 환산단면적을 이용하는데 이 방법은 합성단면을 한 가지 재료로만 구성된 가상의 등가단면으로 환산하는 것이다. 새로운 단면은 환산단면이라 불린다. 환산단면적은 두개의 강성값을 하나의 강성값으로 환산을 하는데 환산된 단면은 처음의 재료적 성질을 잃고 다른 재료의 성질을 갖는다. 물론 단면적은 강성의 변화만큼 영향을 받아서 변화된다. 축변화를 시켜서 얻은 강성값과 원주방향 강성값을 이용하여 등가의 강성값을 환산해보면 표3과 같다.

표 3. 축변화를 이용한 EI값과 구조해석을 통해 얻은 좌굴압력의 감소비율

0	99.84	0	0	99.84	0	0
22.5	77.15	22.72	10.28	53.51	46.41	11.99
45	49.87	50.05	31.26	29.68	70.27	40.68
67.5	37.36	62.58	54.01	22.89	77.09	60.39
90	34.63			21.39	78.58	78.58
0	396.32	0	0	396.32	0	0
22.5	180.88	54.36	8.24	83.20	79.01	13.58
45	86.20	78.25	30.39	41.15	89.62	46.23
67.5	60.52	84.73	60.84	32.69	91.75	70.85
90	56.20			31.06	92.16	92.16
0	353.46	0	0	353.46	0	0
22.5	202.91	42.59	9.19	101.39	71.31	13.81
45	90.55	74.38	32.67	39.96	88.70	47.12
67.5	51.46	86.47	63.02	26.15	93.06	60.27
90	42.32			23.08	93.47	93.47

위의 결과에서 알 수 있듯이 단순히 축변화를 해서 얻은 결과값을 가지고 환산단면적을 이용하여 얻은 결과값과 구조 해석을 수행한 결과값에는 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 직교이방성 재료 2개가 각변화 되면서 원주방향 강성과 길이방향 강성이 두께방향에 대해서 직교이방성이 아닌 Anisotropic한 재료적 특성을 나타나기 때문에 EI의 감소비만큼 좌굴압력이 감소비율이 일치하지 않는 것으로 판단된다.

Layer1을 고정시키고 Layer2만 각도변화를 시켰을 경우보다 Layer1를  $-\theta$  만큼 각변화하고 Layer2  $+\theta$  각변화 했을 경우가 좌굴압력의 감소비가 큼을 알 수 있다. t/D를 증가시켰을 경우 좌굴압력은 증가하는 비율은 완벽하게 일치하지는 않지만 거의 같은 경향을 나타냈다. 또한 0도에서 45도까지 각도변화를 했을 경우엔 좌굴압력의 감소폭이 재료에 따라 90%에 가까운 것도 있었다. 이것은 원주방향 강성이 큰 재료일수록 초기 각변화에 민감한 반응을 보인다는 것으로 판단할 수 있다. 하지만 최종적으로 좌굴압력의 감소비율은 원주방향 강성과 길이방향 강성의 비로 표현되는 강성비의 차이가 큰 재료일수록(A type 4.67, B type 12.81, C type 15.33) 좌굴압력의 감소비율이 최종엔 더 큼을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

재료의 중량이 줄어들고 강도가 고강도화 됨에 따라 구조물은 더욱 얇은 박판구조로 설계-시공되며, 이에 따라 구조물의 좌굴 문제가 더욱 중요하게 된다. FRP는 재료적으로 신소재를 사용함으로써 강도를 증진시킬 수 있지만 구조적으로 좌굴에 대한 안정성을 확보해야하는 구조물이므로 좌굴거동에 영향을 미치는 영향 인자

들 중에서도 지배적인자 즉, 섬유층의 적층각 및  $t/D$ 를 고려하여 섬유보강 복합판에 미치는 정성적, 정량적 영향을 고려하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Layer1고정-Layer2의 적층각을 변화시켰을 경우

1. FRP는 원주방향 강성( $E_1$ )이 클수록 적층각 변화시 좌굴압력이 감소가 크게 나타난다. 즉 FRP는 원주방향 강성이 지배적이다.
2. FRP와 같은 Orthotropic Material은 적층각 변화에 의해 두께방향으로 Anisotropic Material이 되기 때문에 단순히 EI의 감소비 만큼 좌굴압력값의 감소비가 같지 않다.
3. FRP는  $t/D$ 의 비율이 커질수록 좌굴압력값이 비례적으로 커진다.
4. FRP는 Layer1과 Layer2가 각변화하여 Orthotropic Material의 형태를 나타낼 경우엔 Timoshenko의 2D 좌굴공식을 이용할 수 있다.

Layer1을  $-\theta$  만큼 각변화하고 Layer2는  $+\theta$  만큼 각변화 시켰을 경우

1. FRP는 Layer2만  $\theta$ 만큼 변화시키는 것보다 Layer1과 Layer2를  $\theta$ 만큼 변화시키는 경우가 좌굴압력 및 좌굴압력의 감소비율도 크다.
2. 강성비가 클 경우 적층각을 0도에서 67.5도까지 변화시켰을 경우 좌굴모드는 3D 좌굴 모드가 지배적으로 나타나지만 적층각이 67.5도에서 90도 사이에서는 2D 좌굴 모드가 지배적으로 나타난다.
3. 원주방향 강성과 길이방향 강성의 비로 표현되는 강성비가 큰 재료를 사용할 때에는 3D 좌굴에 의한 좌굴압력값의 현격한 감소가 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 길이방향으로의 강성을 증가시킴으로써 좌굴압력의 급격한 감소를 예방할 수 있다.

참고 문헌

1. S.P.Timoshenko and James M. Gere (1961) "Theory of Elastic Stability", 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc.,
2. J.N.Reddy (1997) "Mechanics of Laminated Composite Plates, CRC Press