등분포하중을 받는 복합재료 관로의 적층각 변화에 따른 좌굴 민감도 분석

Buckling Sensitivity of Laminated Composite Pipes
Under External Uniform Pressure Considering Ply Angle

한 택 희* 나 태 수** 한 상 윤*** 강 영 종****
Han, Taek Hee Na, Tae Soo Han, Sang Yun Kang, Young Jong

Abstract

The buckling behavior of a fiber reinforced plastic pipe was researched. When a cylindrical structure is made of isotropic material, it shows two dimensional buckled shape which has same deformed section along the longitudinal direction. But an anisotropic cylindrical structure shows three dimensional buckled shape which has different deformed section along the longitudinal direction. Because the modulus of elasticity is varied in a certain direction when ply angles are changed, the strength of a pipe are changed as ply angles are changed. In this study, the limitation of two dimensional and three dimensional buckling mode was investigated and the buckling strength of a laminated composite pipe was evaluated.

요 지

본 연구에서는 등분포 하중을 받는 섬유 보강 복합재료 관의 좌굴 거동을 분석하였다. 등방성의 원통형 구조물의 경우, 좌굴 형상은 단면만 변형할 뿐 길이방향으로의 단면 형상은 일정한 2차원 좌굴이 발생하나, 섬유 보강 복합재료와 같은 이방성 재료로 구성된 원통형 구조물의 경우에는 길이 방향으로 단면의 형상이 변화하는 3차원 좌굴이 발생하게 된다. 또한 적층 구조물에서는 적층각의 변화에 따라 각 방향에 따른 재료의 강도가 변화하므로, 적층각의 변화는 구조물의 강도를 변화시킨다. 본 연구에서는 원통형 적층 구조물의 2차원 좌굴과 3차원 좌굴의 경계를 조사하고, 적층각 변화에 따른 섬유 보강 복합재료 관의 좌굴 강도를 평가하였다.

Keywords : Pipe, Buckling Strength, Composite, Laminated
핵심 용어 : 관로, 좌굴 강도, 복합 재료, 적층 구조

* 정회원, 고려대학교 공학기술연구소 연구교수, 공학박사
** 현대건설 주식회사 대리, 공학석사
*** 정회원, 고려대학교 강구조협동과정 박사과정, 공학석사
**** 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사

E-mail : taekie@korea.ac.kr 02-924-0190

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2007년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

현대에는 재료의 경량화 및 고강도화에 따라 구조물은 더욱 얇은 박판구조로 설계-시공되며, 이에 따라 구조물의 좌굴 문제가 더욱 중요하게 된다. 최근 고강도 재료인 섬유보강 복합재료(FRP : Fiber Reinforced Plastic)를 사용한 관로가 점차 사용되고 있으며, 이러한 원통형 구조물의 경우에는 압축력이 지배 인자로 작용하는 구조물이기 때문에 좌굴 문제가 중요하다. 이러한 관로에 대하여, 섬유 보강 복합재료는 강재에 비해 무게비 강성이 크기 때문에 더욱 경제적이라 할 수 있다.

섬유 보강 복합재료를 이용한 지중 관로는 재료적으로 신소재를 사용함으로써 강도를 증진시킬 수 있지만 박판 구조이기 때문에, 구조적으로 좌굴에 대한 안정성을 반드시 확보해야한다. 하지만, 고강도, 내부식성 등의 장점에도 불구하고 섬유 보강 복합재료 구조는 국내외적으로 실제적이고 구체적인 연구가 전반적으로 부족한 실정이다. 따라서 섬유 보강 복합재료의 장점이 여러 가지 연구를 통하여 입증되고 있는 현 시점에서, 섬유 보강 복합재료의 좌굴거동에 대한 연구가 수행된다면 시공성과 경제성, 안정성의 모든 면에서 매우 큰 의미가 있으며, 관로 이외에도 섬유 보강 복합재료를 보다 폭넓은 건설재료로 사용할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 좌굴거동에 영향을 미치는 영향 인자들 중에서 지배적 인자인 섬유의 적층각 및 두께-직경비를 고려하여 관로의 좌굴강도에 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. 최근까지 이에 관련된 연구는 Marston(1930), Watkins(1933), Spangle(1948) 등의 몇몇 연구자들에 의해 수행되었을 뿐이며, 특히 국내에서의 연구수행은 미미한 실정이다. 외국의 섬유 보강 복합재료에 대한 연구동향을 살펴보면 1975년에 Tennyson은 적층복합관의 압축실험을 수행하였으며, 1985년에 Simitses et al은 실험 연구 및 수치해석 연구를 수행하였다. 최근, 1997년에 Dutta는 섬유 보강 복합재료의 장기 처짐에 관한 연구를 수행하였다. 이처럼 현재까지 섬유보강 복합관과 같은 적층 구조물에 대한 축방향 압축에 대한 연구가 많이 수행되고 있으나, 등분포 압축력을 받는 경우에 대한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 섬유보강 복합 재료로 구성된 관로의 좌굴거동에 영향을 미치는 변수들 중에서 지배적인 인자인 섬유의 적층각 및 관의 두께-직경비를 매개변수로 하여 등분포 압축력을 받는 관로의 좌굴 특성을 파악하고자 한다.

2. 유한요소 해석 및 변수결정

섬유 보강 복합재료로 구성된 관로는 섬유의 배열 및 관로의 두께-직경비의 영향으로 좌굴 특성이 변화하며, 원주방향 강성 및 길이방향 강성이 좌굴에 영향을 미치는 구조물이다. 복합재료는 제작 시 원하는 방향으로 강성을 조절할 수 있어 무수한 강성의 조합이 가능하기 때문에 해석상 모든 강성의 조합을 고려할 수는 없다. 따라서 일반적으로 많이 사용되는 3가지 종류의 복합재료의 강성비로 해석 대상을 한정 하고, 적층수도 여러 층으로 구성될 수 있으나, 본 연구에서는 두개의 섬유판으로 적층된 복합 재료 관로에 대해서 좌굴특성을 파악하고자 한다.

본 연구의 유한요소해석에는 8절점 Thin Shell (QSL8) 요소를 사용하였다. 탄성계수는 이방성 재료를 고려하기 위하여, 원주방향과 길이방향의 탄성계수를 서로 다르게 적용하였으며, 원주방향의 탄성계수 값이 더 큰 값을 갖도록 하였다. 등방성 재료로 구성된 원통형 구조물은 길이 방향과 원주방향의 강성이 동일하기 때문에 길이 방향에 따라 좌굴된 단면의 형상이 변화하지 않는 2차원 좌굴 형상을 보이기 때문에 2차원 해석으로도 좌굴 해석이 가능하나, 등방성 재료로 구성되더라도 파형구조물이거나, 이방성 재료로 구성된 경우에는 원주방향과 길이방향의 강성의 차이가 존재하게 되어, 길이 방향에 따라 단면의 좌굴형상이 변화하는 3차원 좌굴형상을 갖게 된다. 따라서 이방성 재료로 구성된 관로의 정확한 해석을 위해서는 반드시 3차원 해석을 수행해야한다.

이방성 재료인 복합재료로 구성된 관로는 원주 방향의 탄성계수가 동일한 경우에도 길이 방향의 탄성계수가 변화함에 따라 좌굴 강도가 변화할 수 있으며, 적층구조의 특성상 적층각에 따라 원주 방향과 길이 방향의 탄성계수가 변화하게 된다. 관로의 좌굴 해석을 위해 이러한 적층 구조물의 특징을 고려하여, 범용 구조 해석 프로그램인 LUSAS(Version 13.4)를 사용하여 좌굴 해석을 수행하였다.

2.1 해석 모델 제원

해석 대상 관로의 제원은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. D는 관로의 내경이며, t는 관로의 두께이다. R은 관로의 내측 반지름이며, $0.5D$이다. 관로 해석 시의 하중은 관로의 외벽 면에 수직으로 등분포하게 작용하였으며, Fig. 2에서와 같이 관로의 반(half body)을 모델링하여 경계조건은 point 1, point 2 에서는 y방향으로 변위를 구속하고, 기울기가 0인 경계조건과 일치하게 구속하였다. line 1과 line 2는 관로가 무한히 길다고 가정하므로 길이방향의 변위는 생기지 않는다는 가정을 만족시키기 위해서 z방향 변위를 구속하였다. point 3은 강관의 강체 거동(rigid body motion)을 방지하기 위해서 x방향 변위를 구속하였다.

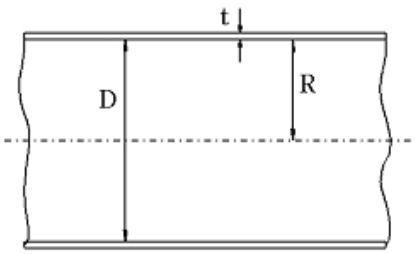

Fig. 1 원통형 구조물의 단면 제원

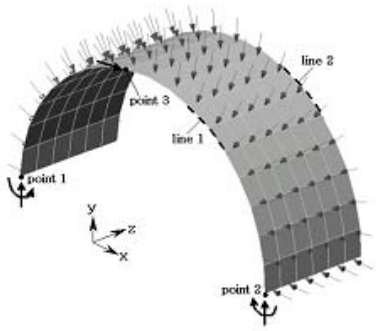

Fig. 2 해석 모델의 하중 및 경계 조건

섬유의 적층 방법은 구조해석 방법에 따라 첫 번째는 원주방향으로 layer 1을 고정시키고 layer 2는 각도 변화($+\theta$)를 주면서 구조 해석을 하였고, 두 번째는 layer 1과 layer 2를 동시에 각도 변화($-\theta$, $+\theta$)를 시켜 구조 해석을 수행하였다. 각도의 변화 방법과 축의 방향은 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 해석에 사용된 적층 재료는 복합재료에서 일반적으로 널리 쓰이는 유리섬유-에폭시(glass-epoxy), 그라파이트-폴리머(graphite-polymer),그라파이트-에폭시(graphite-epoxy)를 사용하였으며, 각 재료의 물성치를 Table 1에 나타내었다.

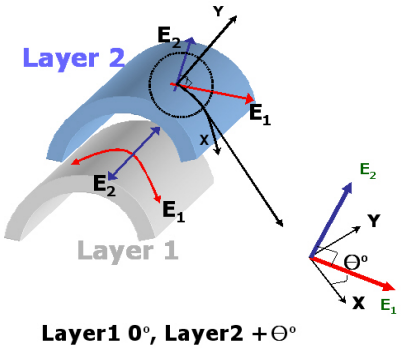

Fig. 3 섬유의 적층각 변화
(layer 1: 고정, layer 2: $+\theta$변화)

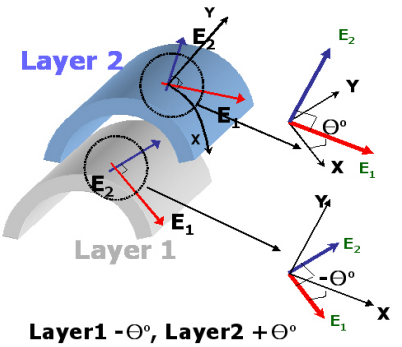

Fig. 4 섬유의 적층각 변화
(layer 1: $-\theta$변화, layer 2: $+\theta$변화)

Table 1 해석 적층 재료 및 물성치 (GPa)

Material	Glass-Epoxy	Graphite-Polymer	Graphite-Epoxy
E1	38.6	155	138
E2	8.27	12.1	9
G12	4.14	4.4	6.9
G13	4.14	4.4	6.9
G23	3.45	3.2	6.21
ν12	0.26	0.248	0.3

2.2 해석 모델의 수렴도 분석

현재 등분포하중을 받는 등방성 원형 아치에 대한 좌굴해석에 대해서는 Timoshenko등 여러 연구자들에 의해 연구가 수행되었다. 그러나 이방성 섬유보강 복합 재료 관로의 좌굴해석에 등방성 원형 아치의 좌굴식을 그대로 적용하는 것은 무리가 있다. 복합재료로 구성된 관로의 경우 적층각이 변화함에 따라 좌굴 가도가 변화하며, 이를 등방성 재료에 대한 기존 연구 결과와 비교할 때 차이가 있다. 하지만 이방성 복합재료로 구성된 관로의 좌굴 해석도 기존의 등방성 재료로 구성된 아치의 좌굴식이 기본이 되므로, 선행과정으로 원형 아치의 좌굴해석에 대한 적절한 모델을 선정하여 수렴도 검증을 수행하고자 한다.

유한요소해석의 결과는 해석 모델의 요소 수에 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 직경은 200mm, 관의 두께는 6mm인 모델을 사용하였으며, 길이방향에 대한 수렴도는 Graphite-Polymer를 대표로 나타내었다.

섬유보강 복합관에 대해 원주방향과 길이방향에 대

Table 2 요소 수에 따른 원주 방향 수렴도

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

하여 수렴도를 검증해 보았다. 원주방향으로는 요소수를 16개부터 128개 까지 나누어서 해석을 수행한 결과 Table 2에 나타난 바와 같이 요소 수가 64개 이상이면 수렴하는 것으로 판단된다. 길이방향으로는 layer 1과 layer2를 원주방향으로(0도) 고정시킨 후 관의 길이 대 직경의 비(L/D)를 1부터 32.5까지 해석을 수행한 결과 L/D가 7.5까지는 Fig. 5와 같은 2차원 좌굴모드를 가짐을 알 수 있었다. 그러나 L/D의 비가 10이상부터는 Fig. 6과 같이 좌굴모드가 2차원이 아닌 3차원의 형태를 나타남을 알 수 있다.

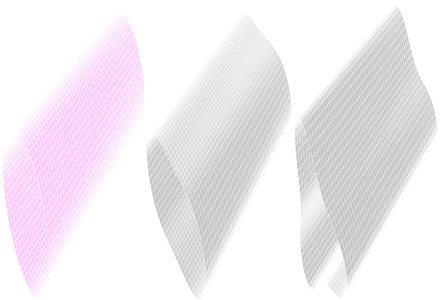

Fig. 5 이방성 재료 관로의 2차원 좌굴모드

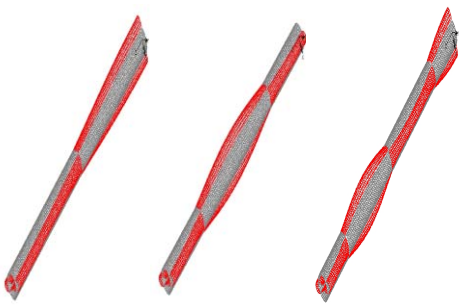

Fig. 6 이방성 재료 관로의 3차원 좌굴모드

이러한 경향은 유한요소해석에 사용된 모든 재료에 대해서 일정한 경향을 나타냈다. 유한요소해석을 수행한 좌굴 모드를 비교해 보면, 2차원 좌굴 모드는 길이 방향에 대해 단면 형태가 일정한 형태를 나타내지만 3차원 좌굴 모드를 살펴보면 길이방향에 대해서도 변형이 일어남을 알 수 있다. 3차원 좌굴 모드는 길이 방향의 강성과 원주 방향의 강성 차이에 의해 발생하는데, 적층각의 변화에 따라 길이 방향의 강성 값이 감소하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. Fig. 7의 그래프에서 보면 해석 대상 관로는 2차원 좌굴 강도와 3차원 좌굴 강도의 차이가 크지 않는데 이것은 원주방향강성과 길이방향강성의 비가 그리 크지 않은 재료이기 때문이다. 만약 원주방향과 길이방향강성비가 크다면 2차원 좌굴 강도와 3차원 좌굴 강도가 상당한 차이를 보일 것이다.

3. 해석결과

본 연구에서는 섬유보강 복합관의 좌굴거동에 영향을 미치는 변수를 변화시켜가면서 구조해석을 수행하였다. 좌굴 강도에 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/D를 변화시킴과 동시에 각각에 대해 적층각을 변화시켜가면서 좌굴 강도의 변화를 정성적, 정량적으로 알아보았다. 먼저, 첫 번째로 layer 1은 원주방향으로(0도) 고정을 시키고 layer 2를 각도변화를 시켜가면서 구조 해석을 수행하고 두 번째로 layer 1과 layer 2를 동시에 같은 각도만큼을 반대로($-\theta$, $+\theta$) 변화시켜가면서 구조 해석을 수행하였다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 알 수 있듯이 각각의 적층각에서 t/D의 비가 증가할수록 좌굴 강도값이 커짐을 알 수 있다. 즉 섬유 보강 복합 재료관의 직경이 일정하다면 관의 두께가 커질수록, 두께가 일정하다면 관의 직경이 작아질수록 좌굴응력이 커짐을 알 수 있다.

또한 Fig. 10과 Fig. 11에서 알 수 있는 것은 적층각의 변화에 따른 좌굴 강도의 변화인데 layer 1을 고정시키고 layer 2만 각변화를 시켰을 경우보다 Layer1은 $-\theta$ 만큼 각변화하고 layer 2는 $+\theta$ 만큼 각변화 했을 경우가 좌굴에 대해 민감함을 알 수 있다.

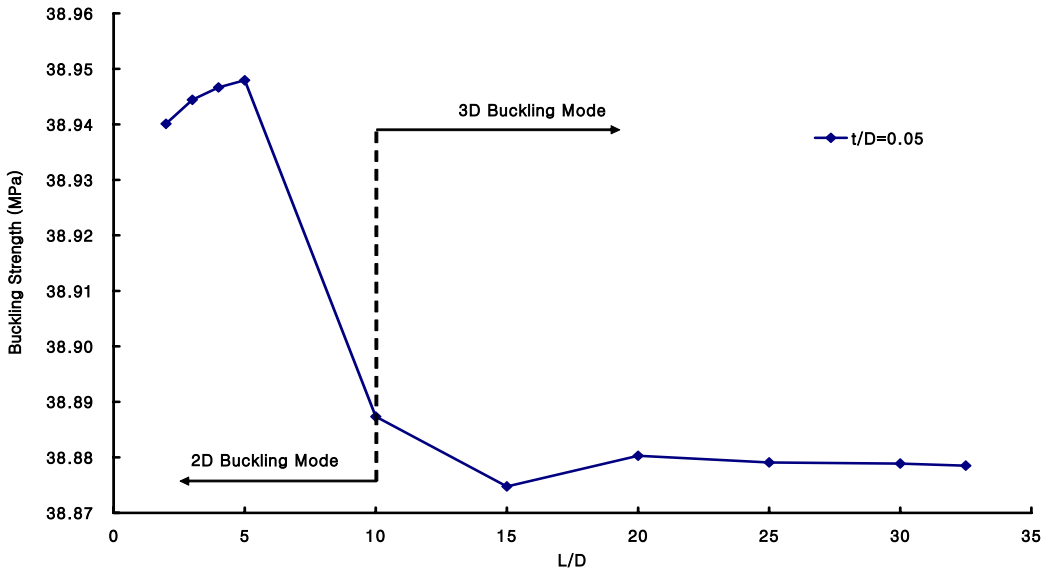

Fig. 7 이방성 재료 관로의 길이 방향 수렴도 (Graphite-Polymer)

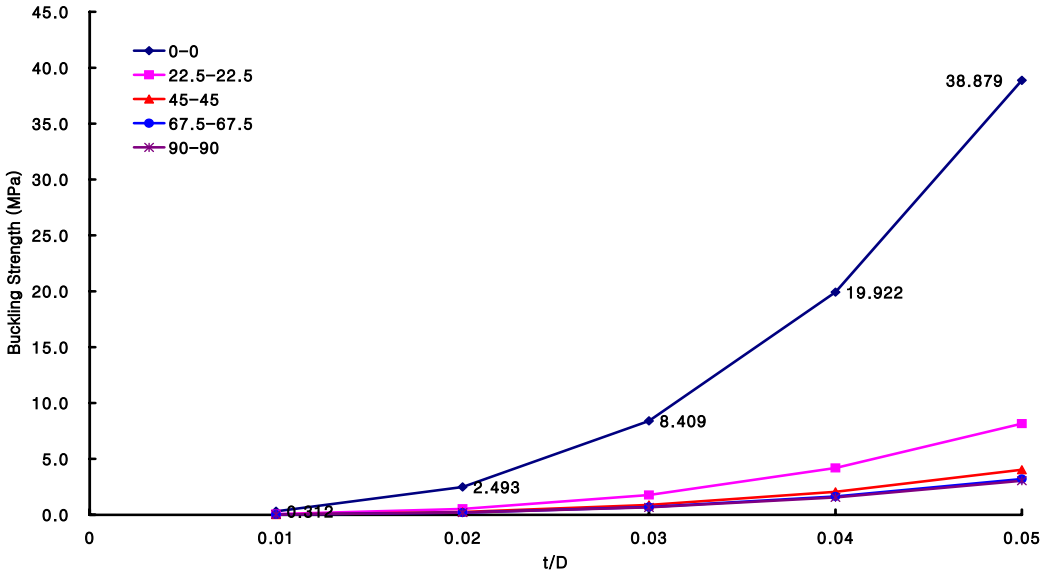

Fig. 8 적층각 변화를 고려한 t/D에 따른 좌굴 강도 (Graphite-Polymer, layer 1 : $-\theta$, layer 2 : $+\theta$)

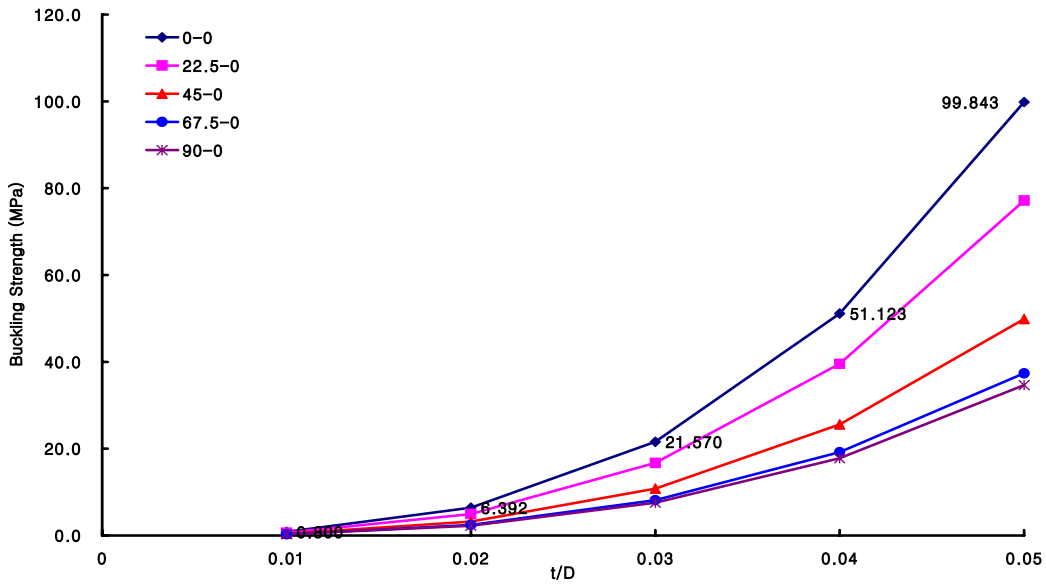

Fig. 9 적층각 변화를 고려한 t/D에 따른 좌굴 강도 (Graphite-Epoxy, layer 1 : 고정, layer 2 : $+\theta$)

이렇게 각변화에 따른 좌굴압력의 감소가 나타나는 것은 원주방향의 섬유강성이 섬유보강 복합관의 좌굴 성능에 지배적인 역할을 하기 때문이며, 두 층의 각을 동시에 변화시킴에 따라 원주방향의 강성이 더 급격히 감소하기 때문이다.

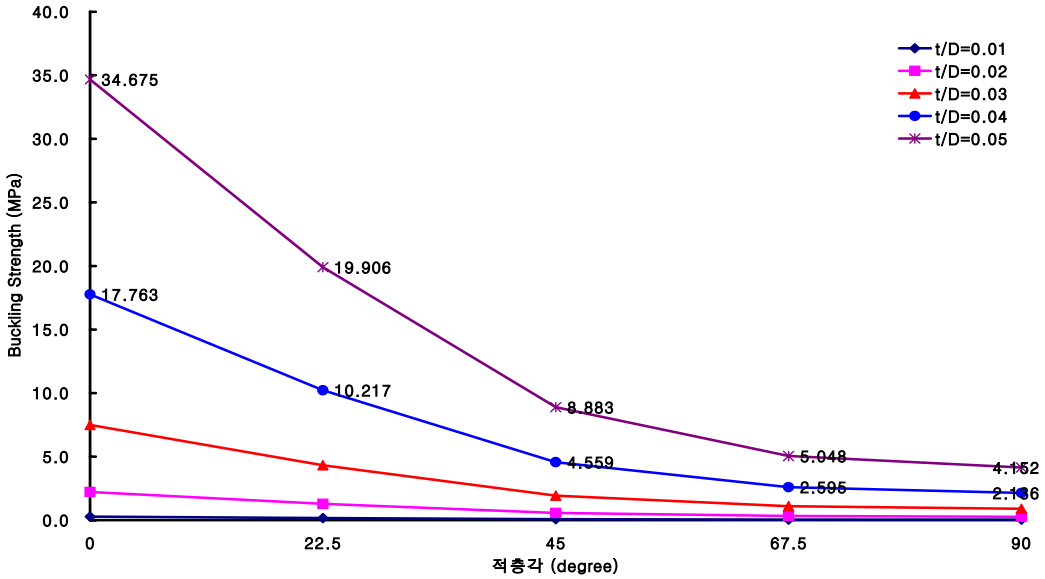

Fig. 10 t/D를 고려한 적층각 변화에 따른 좌굴 강도 (Graphite-Epoxy, layer 1 : 고정, layer 2 : $+\theta$)

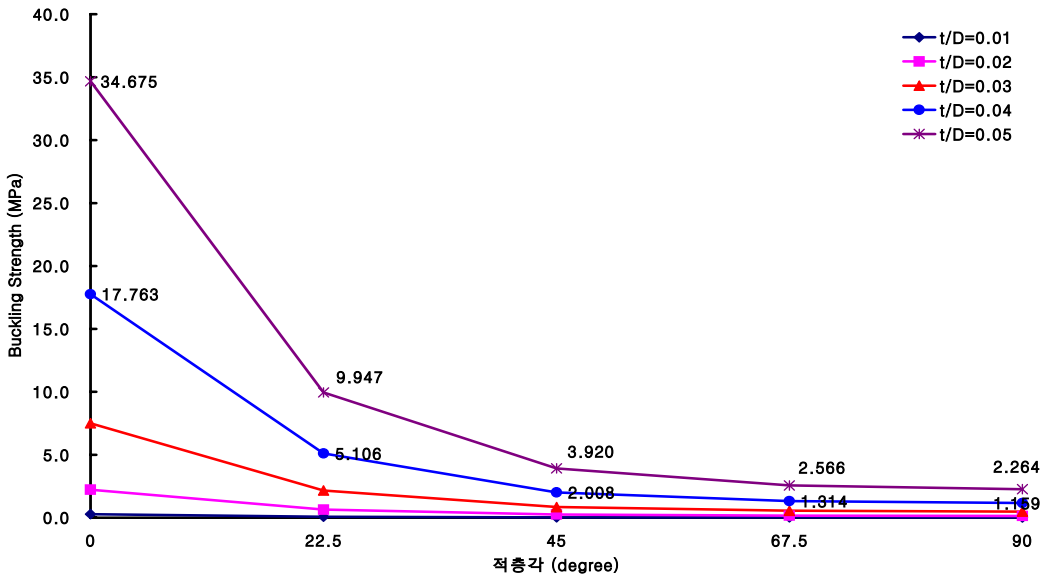

Fig. 11 t/D를 고려한 적층각 변화에 따른 좌굴 강도 (Graphite-Epoxy, layer 1 : $-\theta$, layer 2 : $+\theta$)

이종의 재료로 구성된 구조물에서 등가의 강성 값을 얻기 위해서는 환산단면적을 이용하는데 이 방법은 합성단면을 한 가지 재료로만 구성된 가상의 등가단면으로 환산하는 것이다. 환산단면적은 두개의 강성 값을 하나의 강성 값으로 환산을 하는데 환산된 단면은 처음의 재료적 성질을 잃고 다른 재료의 성질을 갖는다.

Table 3 유한 요소 해석과 등가 환산에 의한 좌굴 강도의 차이 (Glass- Epoxy, t/D=0.05)

적층각 (degree)	좌굴강도 (MPa)	
	유한요소	등가 환산법
0-0	9.794	9.794
0-22.5	7.568	8.790
0-45	4.892	6.733
0-67.5	3.665	4.505
0-90	3.397	4.077

물론 단면적은 강성의 변화만큼 영향을 받아서 변화된다. 축변화를 시켜서 얻은 강성 값과 원주방향 강성 값을 이용하여 등가 환산법에 의한 좌굴 강도와 유한요소 해석에 의한 좌굴 강도의 값을 비교하면 Table 3 및 Table 4와 같다. Table 3은 t/D가 0.05인 Glass-Epoxy 관에서 layer 1은 고정하고 layer 2는 각을 변화 시켰을 때이며, Table 4는 t/D가 0.05인 Graphite-Polymer 관에서 layer 1과 layer 2를 모두 변화 시켰을 때이다.

위의 결과에서 알 수 있듯이 단순히 축변환을 이용한 등가 환산법을 이용하여 얻은 결과 값은 유한 요소 해석을 이용하여 얻은 결과와는 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 2개의 직교이방성 재료 층이 각 변화 하면서 변하는 이방성 재료의 특성을 거시적으로 해석하는 등가 환산법에서는 모두 고려하지 못하기 때문이다.

4. 결 론

layer 1을 고정시키고 layer 2만 각도변화를 시켰을 경우보다 layer 1과 layer 2의 적층각을 동시에 변화 시킬 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 각 변화에 민감한 반응을 보인다는 것으로 판단할 수 있다. 하지만 최종적으로 좌굴압력의 감소비율은 원주방향 강성과 길이방향 강성의 비로 표현되는 강성비의 차이가 큰 재료일수록 좌굴압력의 감소비율이 큼을 알 수 있었다. 섬유 복합 재교 관의 좌굴 거동에 영향을 미치는 영향 인자인, 섬유의 적층각 및 t/D를 고려하여 섬유보강 복합관의 좌굴 강도에 미치는 정성적, 정량적 영향을 고려하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Table 4 유한 요소 해석과 등가 환산에 의한 좌굴 강도의 차이 (Graphite-Polymer, t/D=0.05)

적층각 (degree)	좌굴강도 (MPa)	
	유한요소	등가 환산법
0-0	38.879	38.879
22.5-22.5	17.744	33.599
45-45	8.456	20.905
67.5-67.5	5.937	8.223
90-90	5.513	3.036

1) 관의 원주방향 강성(E1)이 클수록 적층각 변화 시 좌굴압력이 감소가 크게 나타난다.
2) 등방성 원형 아치와 마찬가지로, t/D의 비율이 커질수록 좌굴 강도가 증가한다.
3) 한 층의 적층각만을 변화시킬 때보다, 두 층의 각도를 반대 방향으로 동시에 변화시킬 때 좌굴 강도의 감소 비율이 높게 나타난다.
4) 강성비가 클 경우 적층각을 0도에서 67.5도까지 변화시켰을 경우 좌굴모드는 3차원 좌굴 모드가 지배적으로 나타나지만 적층각이 67.5도에서 90도 사이에서는 2차원 좌굴 모드가 지배적으로 나타난다.
5) 원주방향 강성과 길이방향 강성의 비로 표현되는 강성비가 큰 재료를 사용할 때에는 3차원 좌굴에 의한 좌굴 강도의 감소가 크게 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 길이방향으로의 강성을 증가시킴으로써 좌굴압력의 급격한 감소를 예방할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 『삼성물산(주) 건설부문』의 지원에 의하여 수행되었으며, 지원기관에 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Marston, "The Theory of External Loads on

Closed Conduits", Bulletin No. 96, Iowa ENG., 1930.
2. Watkins, "Structural Mechanics of Buried Pipes", Utah UNI, UT 84322., 1993.
3. Spangler, "Underground Conduits Transaction" ASCE, Vol. 113., 1948.
4. Tennyson RC., "Buckling of laminated composite cylinders", Composites, Vol. 1, 1975, pp.17-24.
5. Simitses GJ, Shaw D, Sheinman I., "Stability of imperfect laminated cylinders: a comparison between theory and experiment", AIAA Journal, vol. 23, 1985, pp.1086-1092.
6. Dutta PK, Hui D. "Creep study of FRP composite rebars for concrete", Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Au
7. S. P. Timoshenko and James M. Gere, "Theory of Elastic Stability", 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., 1961.

(접수일자 : 2006년 6월 19일)