

# 리브로 보강된 GFRP 관로의 탄성 좌굴거동 특성

## Elastic Behavior Characteristics of GFRP Pipes Reinforced Ribs

한택희<sup>1)</sup> · 서주형<sup>2)</sup> · 염응준<sup>3)</sup> · 강영종<sup>4)†</sup>

Han, Taek Hee Seo, Joo Hyung Youm, Eung Jun Kang, Young Jong

요약: 본 연구에서는 리브로 보강된 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic) 관로의 탄성 좌굴 강도를 산정하였다. 보강된 리브의 두께, 높이, 배치 간격은 관로의 좌굴 강도에 영향을 미치는 주요 인자이다. 또한, GFRP 재료는 이방성 재료이므로, 재료의 방향별 강성 또한 관로의 좌굴강도에 영향을 미치는 인자로서 고려되어야 할 부분이다. 이러한 매개변수를 적용하여, 직교 이방성 재료로 구성된 리브 보강 관로의 좌굴 강도를 유한요소 해석을 이용하여 매개변수를 수행하고, 회귀분석을 통하여 좌굴 강도 산정을 위한 간략식을 제시하였다.

ABSTRACT: The elastic buckling strength of a Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) pipe reinforced with ribs was evaluated. The height and thickness of a rib and the spacing between two adjacent ribs were considered as factors affecting the buckling strength of the pipe. And also, the ratio of the longitudinal stiffness and transverse stiffness was considered as the parameter affecting the buckling strength as the GFRP is orthotropic material. Buckling strengths of various GFRP pipe models with different shapes and stiffness ratios were evaluated by FE analyses and a formula to estimate the elastic buckling strength of a rib-reinforced pipe made of orthotropic material was suggested from the regression with the results from the FE analysis. Analytical results show that a rib-reinforced pipe has a buckling strength superior to a general flat pipe and the suggested formula estimates accurate buckling strength of the rib-reinforced pipe.

핵심용어: GFRP, 관로, 좌굴, 이방성 재료, 리브

KEYWORDS: GFRP, pipe, buckling, orthotropic material, rib

### 1. 서론

구조물은 시대가 흐름에 따라 많은 변화를 거듭해 왔다. 고대에는 흙과 돌, 그리고 나무에서부터 근대와 현재에 이르러서는 콘크리트와 철이 구조물의 주요 소재로 사용되고 있고 최근에는 항공기나 선박 등에 주로 사용되었던 복합소재를 이용한 구조물이 연구 개발되어 건설소재로써 사용되고 있다. 이렇게 새로 개발되는 소재들은 꾸준히 고강도화 되고 있고 최근에는 복합소재(FRP)가 주요한 건설 재료로 주목받고 있다. 플라스틱으로 보강된 신소재인 FRP(Fiber Reinforced Plastic)는 보강 재료에 따라 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), AFRP(Aramid Fiber Reinforced Plastic), GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic), 그리고 VFRP (Polyvinyl

Fiber Reinforced Plastic)로 분류되며, FRP는 초기에는 특정한 분야에 쓰였으나, 현재에는 많은 공학 분야에 걸쳐 전반적으로 그 사용성이 확대되고 있는 추세이며, 특히 형상의 단순성으로 인하여 자동화 생산이 용이한 관로에 먼저 적용되고 있다. 재료의 중량이 줄어들고 강도가 고강도화 됨에 따라 구조물은 더욱 얇은 박판구조로 설계-시공되며, 이에 따라 구조물의 좌굴 문제가 더욱 중요하게 된다.

현재 국내에 설치된 상·하수관로의 대부분을 차지하고 있는 주철관 및 강관 등의 금속성 관과 콘크리트 재질의 관들은 원재료의 특성상 부식이 발생하게 되며, 이로 인해 스케일, 균열, 파열 등이 발생할 가능성을 안고 있다.

특히, 주철관의 경우에는 그림 1과 같이 부식이 발생하여 녹, 스케일, 박테리아 및 이물질을 발생하게 하여 물의 품질을 비위생적으로 만들며, 내구성을 저하시키는 요인으로도 작용하

1) 정회원, 고려대학교 공학기술연구소 연구교수, 공학박사(taekte@korea.ac.kr)

2) 정회원, 현대건설주식회사 사원, 공학석사(seojoohyung@hotmail.com)

3) 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, 공학석사(tiger56@korea.ac.kr)

4) 교신저자, 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사

(Tel:02-3290-3317, Fax:02-921-5166 E-mail:yjkang@korea.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

며, 흙관 및 콘크리트관은 그림 2와 그림 3과 같이 관의 함몰 및 파손과 같은 문제점이 발생할 수 있으며, 이러한 문제점은 국내 상하수도 관로망에서 전반적으로 발생되고 있다. 이러한 문제의 해결을 위하여 잦은 보수 및 관 교체사업을 지속적으로 진행하고 있는 실정이다. 또한 발생된 부식의 정도와 그 위치를 정확하게 탐지 및 예측하기 어려움에 따라, 문제가 발생된 관로망의 일부 또는 전체 구간을 교체해야 할 경우가 빈번하고, 잦은 보수 및 교체 시공으로 인해 많은 민원이 발생하고 있으며, 이에 따라 정부, 공사 및 지방자치단체에 많은 재원을 확보해야 하는 부담으로 작용하고 있다.



그림 1. 주철관 내의 부식



그림 2. 콘크리트 연결관의 함몰



그림 3. 흙관의 파손, 붕괴

최근까지 지중매설관에 대한 연구는 Marston(1930), Watkins(1933), Spangler(1948) 등의 몇몇 연구자들에 의해 수행되었을 뿐이며, 특히 국내에서의 연구수행은 미미한 실정이다. 외국의 섬유 보강 복합재료 관로에 대한 연구동향을

살펴보면 1975년에 Tennyson은 적층복합관의 압축실험을 수행하였으며, 1985년에 Simitse et al.은 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 경우나 리브로 보강된 복합재료의 관로의 가동에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서 사용된 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic) 재료를 사용한 관로 구조물에서는 압축력이 지배 인자로 작용하는 구조물이기 때문에 좌굴 문제가 중요한 요소이다. 따라서 GFRP를 이용한 관로는 재료적으로 신소재를 사용함으로써 강도, 내구성, 내부식성을 향상시키고 구조적으로는 관의 외부에 리브를 보강함으로써 좌굴에 대한 안정성을 확보할 수 있다. 이를 위해 리브의 단면형상별, 간격별에 따른 유한요소해석을 실시하고 정량적, 정성적 영향에 대한 분석을 통하여 회귀식을 이용한 좌굴강도식을 제안하였다.

## 2. 유한 요소 해석 모델

### 2.1. GFRP의 해석모델 제원

본 연구에서 유한요소해석은 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS(version 6.5)를 사용하여 수행되었으며, 사용 요소는 20절점 solid element를 사용하였다. 탄성계수는 GFRP 재료의 직교이방성 특성에 따라 길이방향과 원주방향에 따라 각각 다른 탄성계수를 적용하였으며, 길이방향에 비해 원주방향의 강성 값이 크도록 적용하였다. 직교이방성 해석은 적층판 전체를 단일재료의 한 층으로 이루어진 판으로 해석하는 등가 단일층 이론을 사용하였으며, 탄성계수는 기존의 연구(2002)에서 실험을 통하여 얻은 값을 바탕으로 원주방향의 탄성계수는  $165,800\text{kgf/cm}^2(16,265\text{MPa})$ , 길이방향의 탄성계수는  $117,000\text{kgf/cm}^2(11,478\text{MPa})$ 의 값을 사용하였다.

리브로 보강된 GFRP 관로의 단면형상은 관의 두께( $t$ ), 직경( $D$ ), 리브의 높이( $h$ ), 리브의 폭( $w$ ), 리브의 간격( $S$ )으로 표현할 수 있다. 현재, 국내에서 생산되고 있는 GFRP 관로는 직경이 500mm 이상인 관의 경우 두께/직경비( $t/D$ )가 0.02로 동일하다. 이를 바탕으로, 리브로 보강된 GFRP 관로의 구조해석 모델로 두께/직경비( $t/D$ )는 0.02로 고정하고 좌굴강도에 영향을 미치는 리브의 높이비( $h/D$ ), 폭비( $w/D$ ), 간격비( $S/D$ )를 매개변수로 결정하여 영향을 알아보았다. 그림 4는 각각의 리브로 보강된 관로의 단면도이며, 그림에 각각의 변수를 표시하였다.

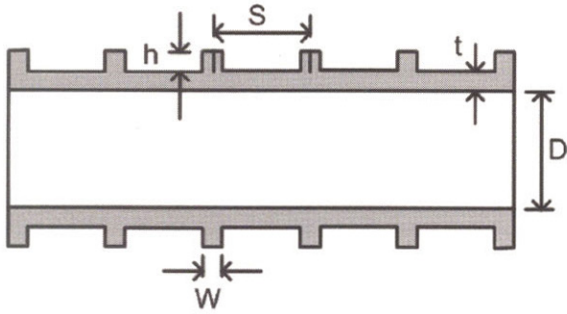


그림 4. 리브로 보강된 GFRP 관로의 단면 형상

리브의 높이비(h/D)는 0.01~0.04, 폭비(w/D)는 0.02~0.10까지, 간격비(S/D)는 0.10부터 변화시키며 구조해석을 수행하였다. 하중조건은 관로의 외벽 면에 연속으로 등분포 하중을 가하였으며, 경계조건은 그림 5와 같이 표현하였다. 관로의 내측 선을 따라 방사방향(radial)과 원주방향(circumferential)의 변위를 구속하고 관의 길이는 무한하다고 가정하여 길이방향의 변위가 생기지 않도록 양끝 단에서 길이방향의 변위를 구속하였다.

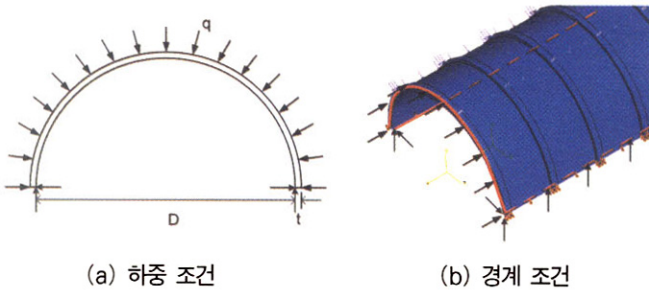


그림 5. 하중 조건 및 경계 조건

## 2.2. 해석모델의 검증

면에 수직인 등분포 하중을 받는 원형 아치에 대한 좌굴해석은 Timoshenko와 Gere(1961)를 비롯한 여러 연구자들에 의해 연구되어왔다. 해석모델의 검증을 위해 위에서 제시한 하중조건과 경계조건을 동일하게 적용하고 검증을 실시하였다. 해석모델의 제원은 직경은 1000mm, 관의 두께는 20mm인 원형관을 사용하였으며 탄성계수(E)는 원주방향의 탄성계수인 65,800kgf/cm<sup>2</sup>를 적용하였다. 하중은 등분포 단위하중을 가하였다. 아치에 대한 좌굴식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{cr} = \frac{kEI}{R^3} \quad (1)$$

여기서, k는 좌굴계수를 나타낸다. 현재까지 연구에서 제안된 좌굴계수는 Rajasekaran과 Padmanabhan(1989)은 2.77, Timoshenko와 Gere(1961)는 3.0을 제안하였으며, Papangelis와 Trahair(1987)는 4.0을 제시하였다. 유한요소 해석을 통해서 얻은 좌굴계수의 값은 2.99로서 Timoshenko와 Gere의 연구와 유사한 값이 산출되었다. 이 결과치를 기존 연구자들의 연구결과와 비교해볼 때, 합리적인 값으로 판단되며, 본 연구에서 사용되는 모델링에 대해서는 타당하다고 판단된다.

## 2.3. GFRP PIPE의 해석 모델 수렴도 검증

유한요소해석의 결과는 해석모델의 요소 수에 따라 상당한 차이를 보인다. 따라서 정해를 알고 있는 모델에 대하여 요소 수별 해석치의 비교를 통하여 적당한 유한요소의 수를 결정해야 한다. 관은 곡선으로 이루어져 있기 때문에 곡선의 거동을 충분히 표현하기 위해서는 충분한 자유도를 갖도록 많은 요소를 사용하여야 하고 따라서 요소의 수에 따른 해석결과의 수렴도를 먼저 검토하였다.

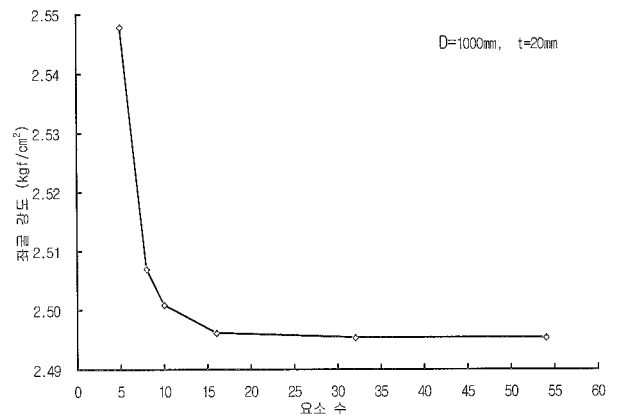


그림 6. 원주방향 수렴도

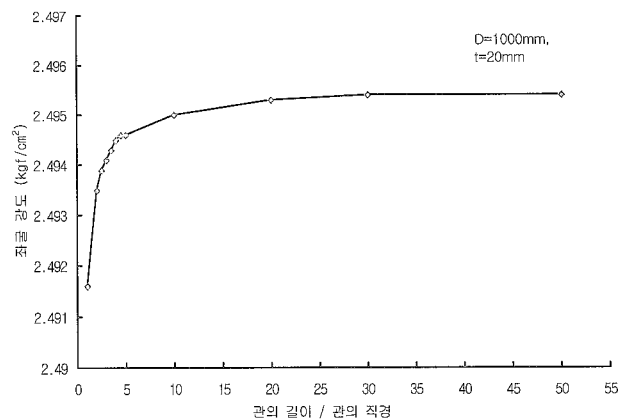


그림 7. 길이방향 수렴도

수렴도는 원주방향과 길이방향으로 나누어 검증하였는데 원주방향으로는 그림 6과 같이 요소의 수가 16개 이상일 때 0.1% 미만의 오차율로 수렴하였고, 길이방향은 그림 7과 같이 길이/직경비(L/D)가 10 이상일 때 0.1% 미만의 오차율로 수렴하는 것으로 나타났다. 그러나 L/D의 비가 커질수록, 길이/원주방향의 강성비가 커질수록 좌굴모드가 2차원이 아닌 3차원의 형태를 나타낸다. 2차원 좌굴 모드는 그림 8과 같이 길이방향에 대해 단면 형태가 일정한 형태를 나타내지만 3차원 좌굴 모드를 살펴보면 그림 9와 같이 길이방향에 대해서도 변형이 일어남을 알 수 있다. 3차원 좌굴 모드는 길이 방향의 강성이 원주방향의 강성과 마찬가지로 줄어들기 때문에 일어나는데 좌굴 모드가 고차로 갈수록 좌굴유효길이가 점점 짧아짐을 알 수 있다.

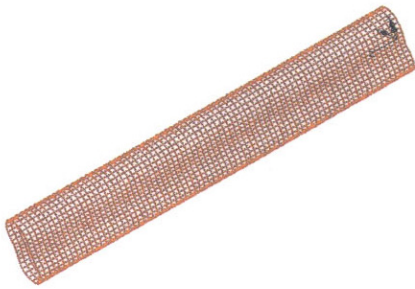


그림 8. 2차원 좌굴모드



그림 9. 3차원 좌굴모드

### 3. 유한 요소 해석 결과

리브로 보강된 GFRP 관로의 단면형상에 따른 좌굴 거동을 보기 위해 위에서 검증한 모델을 가지고 유한요소해석을 실시하였고 매개변수인 리브의 높이, 폭과 간격을 변화시키며 단면형상에 따른 좌굴강도를 해석하였다.

### 3.1 리브의 높이 변화에 따른 유한요소해석

표 1. w/D=0.02일 때 리브의 높이 변화에 따른 좌굴강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

		리브의 간격비 (S/D)				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
높이비 (h/D) = 0.01	유한요소해석	4.129	3.391	3.115	2.994	2.915
	등가단면2차모멘트 해석	4.089	3.329	3.059	2.922	2.838
높이비 (h/D) = 0.015	유한요소해석	5.689	4.235	3.685	3.352	3.280
	등가단면2차모멘트 해석	5.696	4.200	3.657	3.377	3.205
높이비 (h/D) = 0.02	유한요소해석	7.852	5.417	4.481	4.053	3.786
	등가단면2차모멘트 해석	7.985	5.467	4.533	4.046	3.747
높이비 (h/D) = 0.03	유한요소해석	14.227	8.978	6.828	5.852	5.255
	등가단면2차모멘트 해석	14.977	9.440	7.310	6.181	5.480
높이비 (h/D) = 0.04	유한요소해석	23.636	14.160	10.252	8.449	7.359
	등가단면2차모멘트 해석	25.737	15.720	11.752	9.618	8.284

두께/직경비(t/D)는 0.02로 고정하였고 매개변수인 리브의 높이비(h/D)는 0.01부터 0.04까지, 리브의 폭비(w/D)는 0.02부터 0.10까지, 리브의 간격비(S/D)는 0.01 이상의 범위로 변화시켜가며 좌굴강도 값을 나타내었다. 리브로 보강하였을 때 리브를 고려하여 환산한 등가단면2차모멘트 값을 계산하여 등가단면2차 모멘트를 이용하여 Timoshenko의 좌굴식으로 계산한 좌굴강도값과 유한요소 해석에 의한 좌굴강도값을 비교하여 표 1에 나타내었다. 표 1에 나타난 바와 같이 h/D가 작을 경우에는 유한요소 해석에 의한 값과 등가단면2차모멘트에 의한 해석값의 차이가 크지 않으나, h/D가 커질수록 두 해석방법에 의한 차이는 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 10과 표 1에 나타낸바와 같이 리브의 높이비(h/D)가 증가할수록 좌굴강도는 커진다. 즉 관로의 직경(D)이 일정하다면 리브의 높이(h)가 커질수록 좌굴강도는 커진다. 이는 리브의 높이가 커질수록 관의 좌굴강도에 보강적인 측면으로서 단면의 이차모멘트의 증가, 좌굴강도의 증가로 이어지기 때문이다. 그러나 리브의 높이가 관의 직경과 두께에 비해 과도하게 높으면 국부적으로는 리브에 압축력이 발생하여 리브가 기둥과 같이 거동하여 리브의 좌굴이 발생할 수 있다는 측면에서 상한제한선을 둘 수 있다.



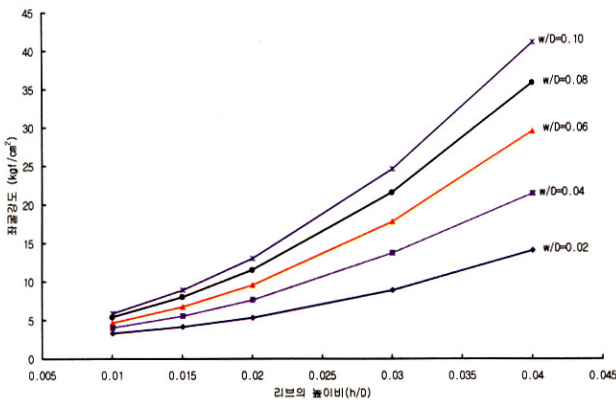


그림 10. h/D에 따른 좌굴 강도 (S/D=0.2)

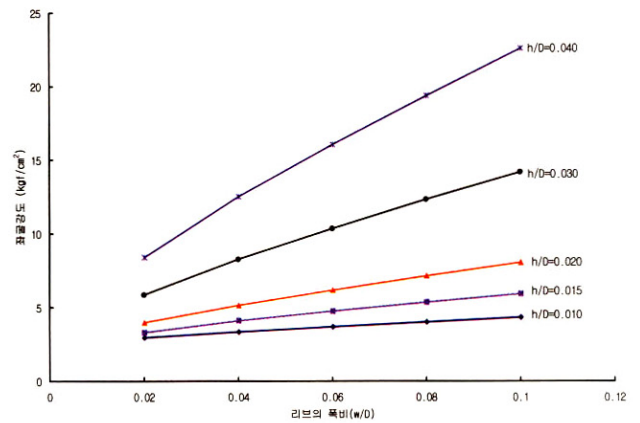


그림 12. w/D에 따른 좌굴 강도 (S/D=0.4)

### 3.2 리브의 폭 변화에 따른 유한요소해석

리브의 폭비(w/D)가 증가할수록 좌굴강도는 커진다. 즉 섬 유보강 복합관의 직경(D)이 일정하다면 리브의 폭(w)이 커질수록 좌굴강도는 커진다. 이는 리브의 폭이 넓어질수록 관의 좌굴강도에 보강적인 측면으로서 단면의 이차모멘트의 증가, 좌굴강도의 증가로 이어지기 때문이다. 그림 11과 그림 12에서 리브의 폭 변화에 따른 좌굴 강도를 나타내었다. 리브의 폭이 증가함에 따라 좌굴강도 값이 선형에 가까운 형태로 증가함을 알 수 있다.

표 2에 나타난 바와 같이, 등가단면2차모멘트에 의한 해석값과 유한요소해석을 통해 얻은 해석값은 리브의 폭이 좁으면 거의 일치하는 값을 보여주지만 리브의 폭이 넓어지면 예상좌굴강도에 비해 유한요소 해석값이 작게 계산된다. 리브의 폭 증가에 따른 좌굴강도는 높이의 증가에 의한 좌굴강도의 증가보다 영향이 작는데 그 이유는 단면이차모멘트의 증가는 폭보다 높이에 더 큰 영향을 받기 때문이다.

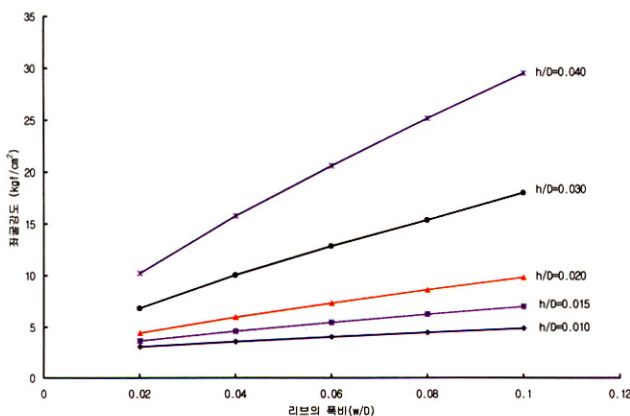


그림 11. w/D에 따른 좌굴 강도 (S/D=0.3)

표 3. 유한요소 해석값의 등가단면2차모멘트에 의한 해석값에 대한 비 (FEM 값/등가해석 값)

간격비 (S/D)	폭비 (w/D)	리브의 높이비 (h/D)				
		0.01	0.015	0.02	0.03	0.04
0.1	0.02	1.010	0.999	0.983	0.950	0.918
	0.04	1.001	0.986	0.970	0.939	
	0.06	0.993	0.978	0.962	0.932	
	0.08	0.987				
	0.1					
0.2	0.02	1.019	1.008	0.991	0.951	0.901
	0.04	1.009	0.991	0.970	0.923	0.838
	0.06	1.001	0.980	0.959	0.919	0.881
	0.08	0.996	0.976	0.957	0.921	0.888
	0.1	0.992	0.974	0.956	0.924	0.893
0.3	0.02	1.018	1.008	0.989	0.934	0.872
	0.04	1.006	0.980	0.948	0.880	0.817
	0.06	0.994	0.960	0.924	0.858	0.802
	0.08	0.985	0.950	0.916	0.848	0.807
	0.1	0.979	0.944	0.913	0.861	0.819
0.4	0.02	1.025	0.993	1.002	0.947	0.878
	0.04	1.015	0.990	0.955	0.875	0.799
	0.06	1.002	0.965	0.922	0.837	0.765
	0.08	0.991	0.949	0.903	0.821	0.755
	0.1	0.982	0.936	0.892	0.816	0.756
0.5	0.02	1.027	1.023	1.010	0.959	0.888
	0.04	1.020	0.998	0.964	0.880	0.797
	0.06	1.009	0.973	0.928	0.834	0.752
	0.08	0.998	0.954	0.904	0.810	0.612
	0.1	0.980	0.939	0.887	0.796	0.725

### 3.3 리브의 간격 변화에 따른 유한요소해석

그림 13과 그림 14에서 나타난 바와 같이 리브의 간격비 (S/D)가 증가할수록, 즉 리브의 간격이 멀어질수록 좌굴강도는 감소한다. 등가단면2차모멘트에 의한 해석값과 유한요소해석을 통해 얻은 해석값은 어느 정도 차이가 발생하긴 하지만 리브의 높이나 폭 변화 의한 좌굴강도의 차이에 비해 작은 값이다. 즉, 리브의 높이와 폭이 일정하다면 리브의 간격변화에 대한 등가단면2차모멘트에 의한 해석값과 유한요소해석을 통해 얻은 해석값은 거의 비슷한 값을 얻을 수 있었다.

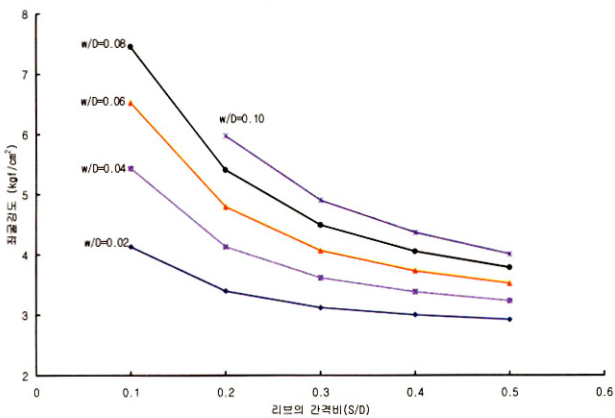


그림 13. S/D에 따른 좌굴 강도 (h/D=0.01)

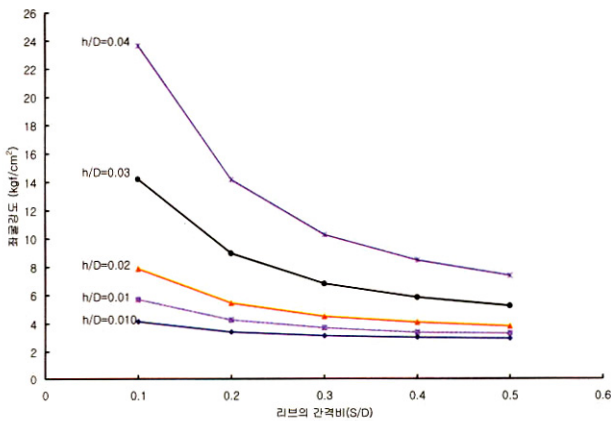


그림 14. S/D에 따른 좌굴 강도(w/D=0.02)

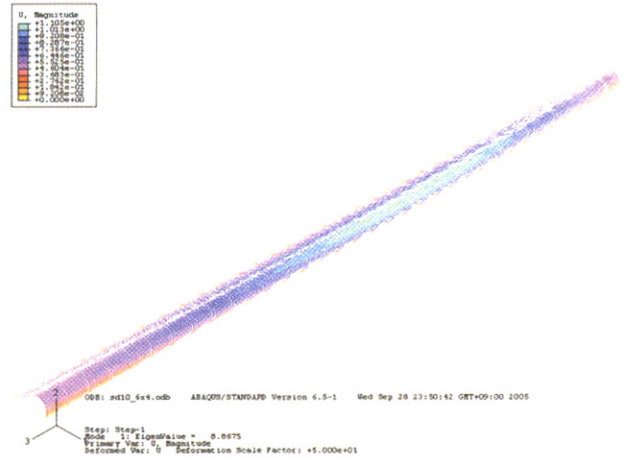


그림 15. 관로의 좌굴 형상 (w/D=0.06, S/w=10)

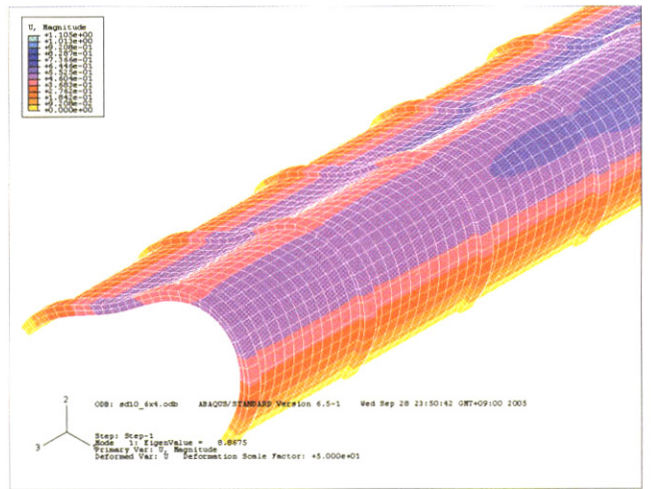


그림 16. 관로의 좌굴 형상 (단부)

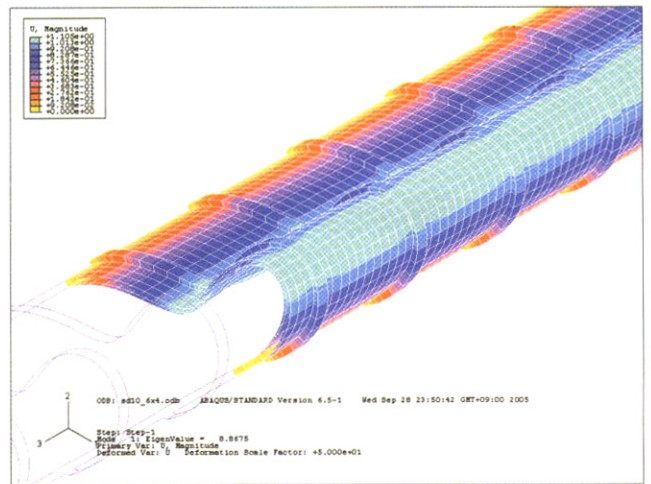


그림 17. 관로의 좌굴 형상 (중양부)

부 좌굴이 발생함을 확인할 수 있었다.

### 3.4 강성비 변화에 따른 강도변화

GFRP 관로는 직교이방성 재료로서 유리섬유와 매트릭스, 층진재 간의 조성량과 비율에 따라 원주방향과 길이방향의 탄성계수 값이 변화한다. 앞서 해석모델의 검증 부분에서 언급한 바와 같이, 원주방향과 길이방향의 강성의 차이가 커지면 관의 좌굴형상 또한 2차원에서 3차원 좌굴의 형태를 띤다. 관의 좌굴은 원주방향으로 발생을 하며 원주방향의 강성이 길이방향의 강성에 비해 지배적인 요소이므로 원주방향의 강성이 길이방향의 강성보다 커야한다. 따라서 탄성계수 비 변화에 따른 강도 변화를 알아보기 위하여 원주방향의 탄성 계수 값을 고정하고, 길이방향의 탄성계수 값을 변화시킴으로써 탄성계수 비(길이방향 탄성계수/원주방향 탄성계수)에 따른 좌굴강도 값의 변화를 살펴보았다.

탄성계수 비 변화에 따른 좌굴강도를 살펴보면 탄성계수 비가 클수록 좌굴강도도 높은 것을 알 수 있다. 3차원 좌굴은 길이방향의 강성과 원주방향의 강성의 차이에서 발생하는데, 원주 방향의 강성은 리브의 보강에 의한 강성이 추가되기 때문에 실제 강성비는 탄성계수의 비 보다 더 클 것이다. 표 3에 나타난 바와 같이 탄성계수 비가 커질수록 즉, 길이방향의 탄성계수가 원주방향의 탄성 계수에 비해 커질수록 실제 강성비는 1에 가깝게 될 것이며, 좌굴에 저항하는 관의 전체 강성이 커지기 때문에 좌굴강도가 높게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

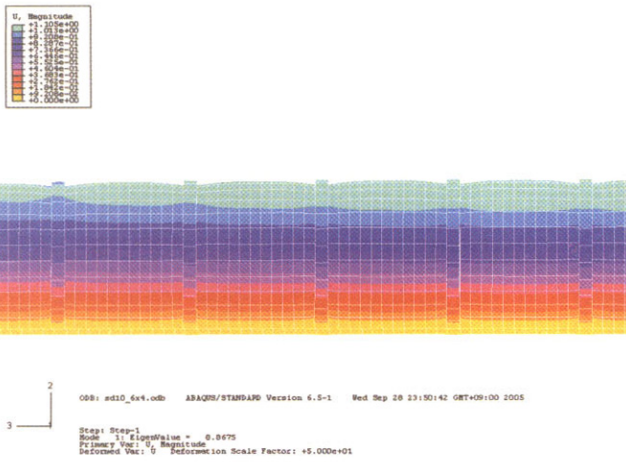


그림 18. 보강 리브 사이의 좌굴 (w/D=0.06, S/w=10)

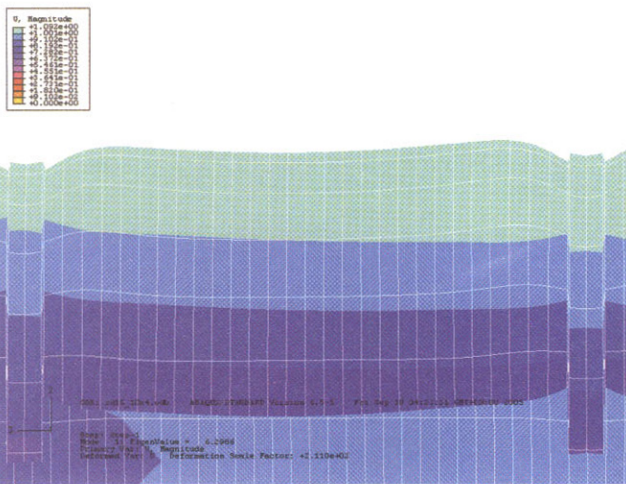


그림 19. 보강 리브 사이의 좌굴 (w/D=0.06, S/w=15)

그림 15~그림 19는 리브로 보강된 GFRP 관로의 유한요소 해석 좌굴형상이다. 그림 15와 같이 관로가 전체적으로 2차원 좌굴형태를 갖는 좌굴이 발생하나 그림 16 및 그림 17과 같이 길이에 따라서 단면의 변형 정도가 다르게 나타나는데, 이는 양 끝단 부분에서의 경계조건에 따른 결과라고 생각된다. 관로가 전체적으로 2차원 좌굴 형태를 보임과 동시에 리브가 보강된 부분과 보강되지 않은 부분의 강성 차이로 인하여 그림 18 및 그림 19와 같이 리브와 리브 사이에서 추가적인 국부 좌굴이 발생한다. w/D=0.06, S/w=10인 모델의 좌굴 형상은 리브와 리브 사이에 반주기(half cycle)의 좌굴 형태를 보이고 있으나, 그림 19와 같이 리브의 간격이 넓어지면 리브와 리브 사이에 1주기(one cycle) 이상의 국부좌굴이 발생함을 볼 수 있으며, 이러한 좌굴형태가 발생할 때, 좌굴강도는 더욱 감소하게 된다. 유한요소 해석 결과 리브의 높이와 폭에 따라 약간의 차이는 있지만 대체적으로 리브의 간격비(S/D)가 0.5를 초과했을 때 리브와 리브 사이에서 한주기 이상의 추가적인 국

표 4. 탄성계수 비 변화에 따른 좌굴강도

h/D	w/D	s/D	탄성계수 비 (길이방향 탄성계수/원주방향 탄성계수)				
			0.2	0.5	0.7	1	2
0.01	0.1	0.5	3.9373	3.9846	4.0054	4.0296	4.0945
0.02	0.02	0.2	5.1406	5.2548	5.2896	5.3222	5.3888
0.02	0.02	0.3	4.3507	4.4446	4.481	4.5188	4.6012
0.02	0.02	0.4	3.9491	4.0235	4.0526	4.0842	4.16
0.02	0.02	0.5	3.6964	3.7604	3.7856	3.8129	3.88
0.03	0.02	0.5	5.0326	5.1954	5.2545	5.3149	5.4461
0.03	0.04	0.5	6.8164	7.0965	7.202	7.3106	7.5465
0.03	0.06	0.5	8.376	8.736	8.8752	9.0208	9.3411
0.03	0.08	0.5	9.8789	10.286	10.445	10.615	10.996
0.03	0.1	0.5	11.297	11.749	11.928	12.119	12.555
0.04	0.1	0.5	17.406	18.299	18.653	19.03	19.875

#### 4. 해석 결과 분석

리브로 보강된 GFRP 관로의 매개변수별 유한요소 해석을 통하여 단면형상별 좌굴강도와 경향을 회귀분석을 통하여 정량적으로 분석하였다. Timoshenko와 Gere(1961)가 제시한 좌굴강도식을 기본으로 단면형상에 관한 형상보정계수를 회귀분석을 통하여 추가하였고 먼저, 등방성일 때(탄성계수 비=1) 리브로 보강한 GFRP 관로의 좌굴강도식의 제안과 정확도를 검증한 후에 탄성계수 비의 변화에 대한 계수를 추가하여 직교이방성 GFRP 관로의 좌굴강도식을 제안하였다. 식 (2)는 리브로 보강된 등방성 관의 좌굴강도식이다. 각 변수의 정의는 식 (3)~식(6)과 같으며 매개변수의 범위는 식 (7)~식 (9)와 같다.

$$q_{cr} = \frac{3EI}{R^3(1-\nu^2)} \quad (2)$$

$$\times \left[ \alpha \ln\left(\frac{h}{2R}\right) + \beta \right] \left(\frac{w}{2R}\right)^{\left[\gamma \cdot \ln\left(\frac{h}{2R}\right) + \delta\right]}$$

$$\alpha = -0.55\left(\frac{S}{2R}\right) \quad (3)$$

$$\beta = -2.8\left(\frac{S}{2R}\right) + 1 \quad (4)$$

$$\gamma = -0.2\left(\frac{S}{2R}\right) + 0.02 \quad (5)$$

$$\delta = -\left(\frac{S}{2R}\right) + 0.09 \quad (6)$$

$$0.005 \leq \frac{h}{R} \leq 0.02 \quad (7)$$

$$0.01 \leq \frac{w}{R} \leq 0.05 \quad (8)$$

$$0.05 \leq \frac{S}{R} \leq 0.25 \quad (9)$$

위에서 제시한 식을 이용하여 얻은 단면형상별 좌굴강도와 실제 유한요소해석을 통하여 얻은 좌굴강도를 비교하여 그래프로 나타내었다. 그 결과 제안된 식으로부터 얻은 좌굴강도는 유한요소해석 결과와 비교하여 -7.4%~6.7% 범위 내의 오차를 나타내어 제안식은 타당하다고 판단된다.

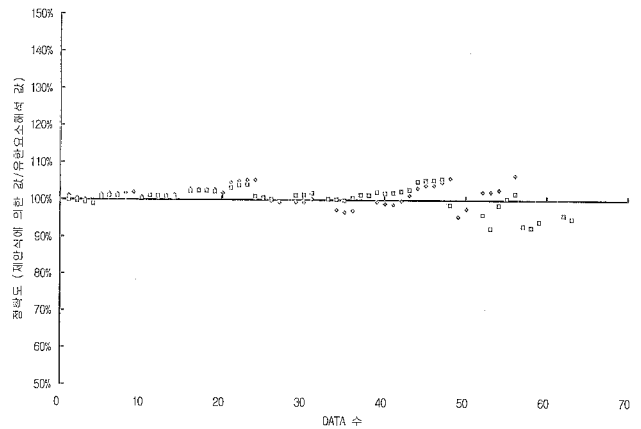


그림 20. 제안식의 정확도

등방성일 때 제안된 좌굴강도식을 바탕으로 길이방향과 원주방향의 탄성계수 비 변화에 따른 리브로 보강된 직교이방성 재료의 GFRP 관로의 좌굴강도식은 식 (10)과 같이 제안할 수 있으며, 이때의 각각의 변수와 적용 범위는 식 (2)와 마찬가지로 식(3)~식(9)와 같이 정의된다.

$$q_{cr} = \frac{3EI}{R^3(1-\nu^2)} \times \left(\frac{E_L}{E_C}\right)^{0.035} \quad (10)$$

$$\times \left[ \alpha \ln\left(\frac{h}{2R}\right) + \beta \right] \left(\frac{w}{2R}\right)^{\left[\gamma \cdot \ln\left(\frac{h}{2R}\right) + \delta\right]}$$

#### 5. 결론

본 연구에서는 GFRP 관을 리브로 보강함으로써 관의 좌굴강도를 향상시키고, 리브의 단면형상에 따라 GFRP 관로의 유한요소해석을 실시하였고 정성적, 정량적 영향을 분석을 통하여 다음과 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 리브의 높이 변화에 따른 좌굴강도는 리브의 높이비(h/D)가 증가할수록 좌굴강도 역시 커진다. 이는 리브의 높이가 커질수록 관의 좌굴강도에 보강적인 측면으로서 단면의 이차모멘트의 증가, 좌굴강도의 증가로 이어지기 때문이다. 그러나 리브의 높이가 관의 직경과 두께에 비해 과도하게 높으면 국부적으로 리브에 압축력이 발생하여 리브가 기둥과 같이 좌굴이 발생할 수 있다.
- (2) 리브의 폭 변화에 따른 좌굴강도는 리브의 폭비(w/D)가 증가할수록 좌굴강도는 커진다. 이는 리브의 폭이 넓어질수록 관의 좌굴강도에 보강적인 측면으로서 단면의 이차모멘트의 증가, 좌굴강도의 증가로 이어지기 때문이다.



- (3) 리브의 간격 변화에 따른 좌굴강도는 리브의 간격비 (S/D)가 증가할수록, 즉 리브의 간격이 멀어질수록 좌굴강도는 떨어진다. 또한, 유한요소 해석 결과 리브의 높이와 폭에 따라 약간의 차이는 있지만 대체적으로 리브의 간격비(S/D)가 0.5를 초과했을 때 리브와 리브 사이의 추가적인 국부 좌굴이 크게 발생한다.
- (4) 탄성계수 비의 변화에 따른 좌굴강도를 살펴보면 탄성계수 비(길이방향 탄성계수/원주방향 탄성계수)가 클수록 좌굴강도도 높은 것을 알 수 있다. 3차원 좌굴은 길이방향의 강성과 원주방향의 강성의 차이에서 발생하는데, 원주 방향의 강성은 리브의 보강에 의한 강성이 추가되기 때문에 실제 강성비는 탄성계수의 비 보다 더 클 것이다. 표 3에 나타난 바와 같이 탄성계수 비가 커질수록 즉, 길이방향의 탄성계수가 원주방향의 탄성 계수에 비해 커질수록 실제 강성비는 1에 가깝게 될 것이며, 좌굴에 저항하는 관의 전체 강성이 커지기 때문에 좌굴강도가 높게 나타나는 것으로 볼 수 있다
- (5) 유한요소해석 결과를 토대로 정량적인 회귀분석을 통하여 리브로 보강된 직교이방성 재료의 GFRP 관로의 좌굴강도식을 식 (11)과 같이 제안하였으며, 각각의 변수와 적용 범위는 식 (12)~식(18)과 같이 정의된다.

$$q_{cr} = \frac{3EI}{R^3(1-\nu^2)} \times \left(\frac{E_L}{E_C}\right)^{0.035} \quad (11)$$

$$\times \left[ \alpha \cdot \ln\left(\frac{h}{2R}\right) + \beta \right] \left(\frac{w}{2R}\right)^{\left[\gamma \cdot \ln\left(\frac{h}{2R}\right) + \delta\right]} \quad (12)$$

$$\alpha = -0.55 \left(\frac{S}{2R}\right) \quad (12)$$

$$\beta = -2.8 \left(\frac{S}{2R}\right) + 1 \quad (13)$$

$$\gamma = -0.2 \left(\frac{S}{2R}\right) + 0.02 \quad (14)$$

$$\delta = -\left(\frac{S}{2R}\right) + 0.09 \quad (15)$$

$$0.005 \leq \frac{h}{R} \leq 0.02 \quad (16)$$

$$0.01 \leq \frac{w}{R} \leq 0.05 \quad (17)$$

$$0.05 \leq \frac{S}{R} \leq 0.25 \quad (18)$$

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

(주)한국화이버 (2002) 내식성 및 내노후성 상하수도용 유리섬유 복합관, 부품 및 생산기술 개발, 연구보고서, (주)한국화이버

Dutta PK, Hui D. (1997) Creep study of FRP composite rebars for concrete, *Proceedings of ICCM-11*, Gold Coast, Au.

Papangelis, J.P., Trahair, N.S. (1987) Flexural-Torsional Buckling of Arches, *Journal of Structural Engineerings*, ASCE, Vol. 113(4), pp.889-906.

Marston (1930) *The Theory of External Loads on Closed Conduits*, Bulletin No.96, Iowa ENG.,

Timoshenko, S.P., Gere, M. (1961) *Theory of Elastic Stability, 2nd Ed.*, McGraw-Hill, Inc.,

Rajasekaran, S., Padmanabhan, S. (1989) Equations of Curved Beams, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 115(5), pp.1094-1111.

Simitses GJ., Shaw D, Sheinman I. (1985) Stability of imperfect laminated cylinders: a comparison between theory and experiment, *AIAA Journal*, Vol. 23, pp.1086-1092.

Spangler (1948) *Underground Conduits Transaction ASCE*, Vol. 113

Tennyson RC. (1975) Buckling of Laminated Composite Cylinders, *Composites*, pp.17-24.

Watkins (1993) *Structural Mechanics of Buried Pipes*, Utah UNI., UT 84322,

(접수일자 : 2006. 6. 28 / 심사일 2006. 8. 7 / 심사완료일 2006. 9. 7)