리브 보강 GFRP 관로의 탄성 좌굴거동 특성

Elastic Behavior Characteristics of GFRP Pipes Reinforced with Ribs

서 주 형* · 한 택 희** · 윤 기 용*** · 강 진 욱**** · 이 명 섭***** · 강 영 종******

Seo, Joo-Hyung · Han, Taek-Hee · Yoon, Ki-Yong · Kang, Jin-Ook · Lee, Myeoung-Sub · Kang, Young-Jong

ABSTRACT

The elastic buckling strength of a 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 on the buckling strength because GFRP is orthotropic material. Buckling strengths of various GFRP pipe models with different shapes and stiffness ratio 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 FE analysis results. Analysis results show that a rib-reinforced pipe has superior buckling strength to a general flat pipe and the suggested formula estimates accurate buckling strength of the rib-reinforced pipe.

Keywords : GFRP pipe, buckling behavior, 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), AFRP(Aramid), GFRP(Glass), 그리고 VFRP(Polyvinyl)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 PIPE 형태로 먼저 적용되고 있다. 재료의 중량이 줄어들고 강도가 고강

* 고려대학교 사회환경시스템공학과 · 공학석사 E-mail: trussbassist@hanmail.net
** 정회원 · 고려대학교 공학기술연구소 연구조교수 · 공학박사 E-mail: taekie@korea.ac.kr
*** 정회원 · 선문대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 E-mail: kyyoon@sunmoon.ac.kr
**** 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 차장 · 공학박사 E-mail: jin.kang@samsung.com
***** 삼성물산(주) 건설부문 토목기술팀 부장 · 공학사 E-mail: ms2ce@samsung.com
****** 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 교수 · 공학박사 E-mail: yjkange@korea.ac.kr

도화 됨에 따라 구조물은 더욱 얇은 박판구조로 설계-시공되며, 이에 따라 구조물의 좌굴 문제가 더욱 중요하게 된다. 본 연구에서 사용된 관로가 고강도 재료인 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)를 사용한 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. 유한요소해석 및 변수결정

2.1. GFRP의 해석모델 제원

유한요소해석에 사용한 요소는 20절점 solid element를 사용하였다. 탄성계수(Modulus of Elasticity)는 GFRP라는 재료특성상 직교이방성으로, 길이방향과 원주방향의 탄성계수를 나누어 해석하였고 길이방향에 비해 원주방향의 강성 값이 크다. 직교이방성 해석은 적층판 전체를 단일재료의 한 층으로 이루어진 판으로 해석하는 등가 단일층 이론(Equivalent Single-Layer Theory)을 사용하였으며, 탄성계수는 실험을 통하여 얻은 값을 바탕으로 원주방향은 165,800kg/㎠, 길이방향은 117,000kg/㎠의 탄성계수 값을 사용하였다. 등방성 관의 좌굴강도는 길이방향의 휨강성이 아니라 원주방향 휨강성(Circumferential flexural rigidity)에 의해 결정되기 때문에 원주방향의 단면2차모멘트를 사용하며, 직교이방성 GFRP 관로의 경우는 원주방향의 휨강성뿐만 아니라 원주방향과 길이방향의 강성비의 차이 또한 휨강성에 영향을 미친다.

리브로 보강된 GFRP PIPE의 단면형상은 관의 두께(t), 직경(D), 리브의 높이(h), 리브의 폭(w), 리브의 간격(S)으로 정의할 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 관의 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.

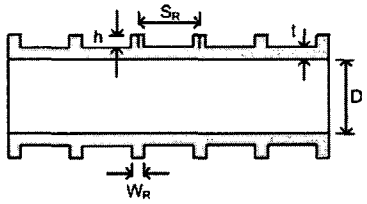

그림 1 리브로 보강된 GFRP PIPE의 횡단면형상

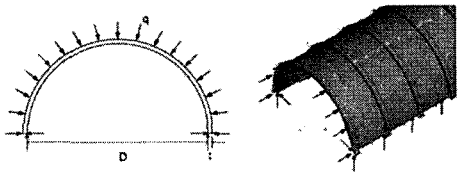

그림 2 하중조건 및 경계조건

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. GFRP관은 연성관이므로 하중조건은 면에 수직으로 등분포 하중을 가하였다. 경계조건은 위 그림과 같다. 관의 내부 라인을 따라 반지름방향과 원주방향의 변위를 구속하고 관의 길이는 무한이 길다고 가정하므로 길이방향의 변위가 생기지 않도록 양끝 단에서 길이방향의 변위를 구속한다.

2.2. 해석모델의 검증

면에 수직인 등분포 하중을 받는 Circular Arch에 대한 좌굴해석은 Timoshenko를 비롯한 여러 연구자들

에 의해 연구되어왔다. 해석모델의 검증을 위해 위에서 제시한 하중조건과 경계조건을 동일하게 적용하고 검증을 실시하였다. 그러나 직교이방성 GFRP PIPE에 등방성 Circular Arch 좌굴식을 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 이방성 복합관의 경우 원주방향의 강성뿐 아니라 길이방향의 강성도 관의 좌굴강도에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 길이/원주방향의 강성비 변화에 따른 좌굴강도는 유한요소해석과 회귀분석을 통해 산정하고 이에 대한 선행과정으로 적절한 모델을 선정하여 해석모델의 검증을 실시하고자 한다. 해석모델의 제원은 직경은 1000mm, 관의 두께는 20mm인 원형관을 사용하였으며 탄성계수(E)는 원주방향의 탄성계수인 165800 kgf/cm^{2}를 사용하였다. 하중은 단위면적당 1kg 씩 가하였다. 아치에 대한 좌굴식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{cr} = \frac{kEI}{R^3} \qquad \text{(식 1)}$$

여기서, k 는 좌굴계수(Buckling coefficient)를 나타낸다. 좌굴계수는 Rajasekaran and Padmanabhan(1989)은 2.77, Timoshenko and Gere(1961)는 3.0 마지막으로 Papangelis and Trahair(1987)는 4.0을 제시하였다. 유한요소해석을 통해서 얻은 좌굴계수의 값은 빔으로 모델링을 하는 경우에는 2.99로 Timoshenko and Gere와 유사한 값이 산출되었다. 이 결과치를 이론적인 값을 비교해볼 때, k의 값이 2.25에서 4사이의 값을 가지므로 합리적인 값으로 판단된다. 그러므로 본 연구에서 사용되는 모델링에 대해서는 타당하다고 판단된다.

2.3. GFRP PIPE의 해석 모델 수렴도 검증

유한요소해석의 결과치는 해석모델의 요소 개수에 따라 상당한 차이를 보인다. 따라서 정해를 알고 있는 모델에 대하여 유한요소의 개수별 해석 치의 비교를 통하여 적당한 유한요소의 개수를 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.

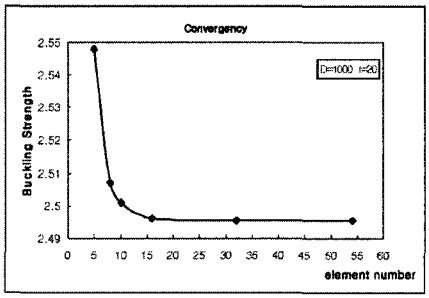

그림 4 원주방향 수렴도

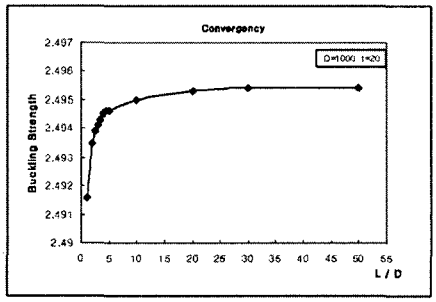

그림 4 길이방향 수렴도

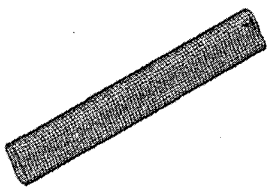

그림 5 2차원 좌굴모드

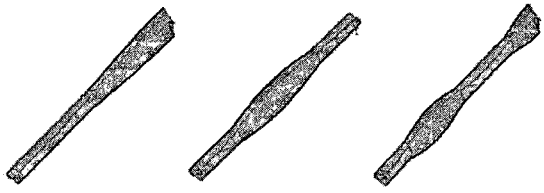

그림 6 3차원 좌굴모드

수렴도는 원주방향과 길이방향으로 나누어 검증하였는데 원주방향으로는 element수가 32개 이상이면 수렴하였고 길이방향은 길이/직경비(L/D)가 20 이상이면 수렴하는 것으로 나타났다. 그러나 L/D의 비가 커질수록, 길이/원주방향의 강성비가 커질수록 좌굴모드가 2차원이 아닌 3차원의 형태를 나타낸다. 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.

2.4. 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.

2.4.1 리브의 높이 변화에 따른 유한요소해석

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. 이차모멘트는 GFRP PIPE를 리브로 보강하였을 때 리브로 보강하지 않은 관에 대하여 어느 정도의 좌굴강도의 증가가 있었는지 I 값을 이용, 비교하기 위해 산정하였다.

표 1 리브의 높이 변화에 따른 좌굴강도 [폭비(w/D)=0.02]

		리브의 간격비 (S/D)				
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
높이비 (w/D) =0.01	좌굴강도	4.129	3.391	3.115	2.994	2.915
	단위길이 당 이차모멘트	1.092	0.889	0.817	0.781	0.758
	I값에 의한 예상좌굴강도	4.089	3.329	3.059	2.922	2.838
	해석치 / 예상좌굴강도	1.010	1.019	1.018	1.025	1.027
높이비 (w/D) =0.015	좌굴강도	5.689	4.235	3.685	3.352	3.280
	단위길이 당 이차모멘트	1.522	1.122	0.977	0.902	0.856
	I값에 의한 예상좌굴강도	5.696	4.200	3.657	3.377	3.205
	해석치 / 예상좌굴강도	0.999	1.008	1.008	0.993	1.023
높이비 (w/D) =0.02	좌굴강도	7.852	5.417	4.481	4.053	3.786
	단위길이 당 이차모멘트	2.133	1.461	1.211	1.081	1.001
	I값에 의한 예상좌굴강도	7.985	5.467	4.533	4.046	3.747
	해석치 / 예상좌굴강도	0.983	0.991	0.989	1.002	1.010
높이비 (w/D) =0.03	좌굴강도	14.227	8.978	6.828	5.852	5.255
	단위길이 당 이차모멘트	4.001	2.522	1.953	1.651	1.464
	I값에 의한 예상좌굴강도	14.977	9.440	7.310	6.181	5.480
	해석치 / 예상좌굴강도	0.950	0.951	0.934	0.947	0.959
높이비 (w/D) =0.04	좌굴강도	23.636	14.160	10.252	8.449	7.359
	단위길이 당 이차모멘트	6.876	4.200	3.140	2.570	2.213
	I값에 의한 예상좌굴강도	25.737	15.720	11.752	9.618	8.284
	해석치 / 예상좌굴강도	0.918	0.901	0.872	0.878	0.888

관 리브로 보강된 GFRP PIPE를 원주방향으로 펼치면 등간격 리브로 보강된 슬래브의 모습과 같고 따라서 등간격 리브로 보강된 슬래브의 휨강성식(flexural rigidity)으로부터 단위길이당 이차모멘트를 계산할 수 있다. 단위길이당 이차모멘트는 리브의 간격(S)을 폭으로 가지는 T-section의 이차모멘트를 간격(S)으로 나

눈 값이다. Arch의 좌굴강도식은 이차모멘트값과 비례하므로 이러한 과정을 통하여 얻은 이차모멘트값을 리브가 보강되지 않은 원형 GFRP PIPE의 이차모멘트값과 비교하여 리브가 보강된 GFRP PIPE의 좌굴강도를 예측하였다. 리브의 높이 변화에 따른 좌굴강도와 해석치/I값을 통한 예상좌굴강도와의 비는 표 1과 같다.

이차모멘트의 증가로 인해 예상된 예상좌굴강도와 유한요소해석을 통해 얻은 해석치는 리브의 높이가 낮으면 거의 일치하는 값을 보여주지만 리브의 높이가 높아질수록 예상좌굴강도에 비해 유한요소 해석값이 작아진다. 그 이유는 리브의 높이가 높아질수록 실제로 하중을 받는 단면적의 증가로 인해 관에 더 큰 하중이 작용하게 되어 관의 좌굴강도는 작아지지만 이차모멘트값의 변화만을 가지고 예상한 예상좌굴강도는 단면적의 증가분을 반영하지 못하기 때문에 해석치가 예상좌굴강도보다 작은 값을 띠며 리브의 높이가 커질수록 그 차는 벌어지는 것으로 판단된다.

표 2 매개변수변화에 따른 좌굴강도
(리브의 높이변화로 정리)

		리브의 높이 (h)				
간격 (S)	폭 (w)	0.01	0.015	0.02	0.03	0.04
0.1	0.02	4.1286	5.6892	7.8515	14.227	23.636
	0.04	5.4302	8.0917	11.693	21.981	46.152
	0.06	6.5227	10.014	14.649	27.684	
	0.08	7.4554				
	0.1					
0.2	0.02	3.3911	4.2354	5.4172	8.978	14.16
	0.04	4.1276	5.647	7.7425	13.827	21.564
	0.06	4.7918	6.8831	9.7327	17.95	29.736
	0.08	5.4073	8.0101	11.526	21.557	35.881
	0.1	5.9728	9.0315	13.123	24.726	41.243
0.3	0.02	3.1152	3.685	4.481	6.8276	10.252
	0.04	3.6118	4.6274	6.0204	10.046	15.811
	0.06	4.0631	5.4672	7.3752	12.843	20.642
	0.08	4.4917	6.2666	8.6668	15.354	25.215
	0.1	4.8988	7.0167	9.8731	18.003	29.567
0.4	0.02	2.9937	3.3515	4.0526	5.8521	8.449
	0.04	3.3779	4.1595	5.2219	8.263	12.56
	0.06	3.7252	4.7987	6.2446	10.339	16.092
	0.08	4.0536	5.4036	7.2121	12.302	19.43
	0.1	4.3656	5.9727	8.1204	14.162	22.636
0.5	0.02	2.9154	3.2799	3.7856	5.2545	7.3586
	0.04	3.2313	3.8709	4.7367	7.202	10.664
	0.06	3.5168	4.3934	5.5729	8.8752	13.486
	0.08	3.7865	4.8862	6.3512	10.445	13.488
	0.1	4.0054	5.3502	7.086	11.928	18.653

표 3 매개변수변화에 따른 해석값/예상좌굴강도
(리브의 높이변화로 정리)

		리브의 높이 (h)				
간격 (S)	폭 (w)	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

그림 7에서 알 수 있듯이 당연하게 리브의 높이비(h/D)가 증가할수록 좌굴강도는 커진다. 즉 섬유보강 복합관의 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 힘을 받는 단면적의 증가로 인해 이차모멘트의 증가에 따른 예상좌굴강도와 실제 좌굴강도와는 차이가 커지게 되고 국부적으로는 리브에 압축력이 발생

하여 리브가 기둥과 같이 리브의 좌굴이 발생할 수 있다는 측면에서 상한제한선을 둘 수 있다.

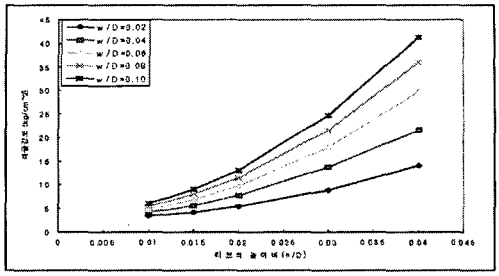

그림 7 h/D-Buckling Strength Relationship (S/D=0.2)

2.4.2 리브의 폭 변화에 따른 유한요소해석

리브의 폭비(h/D)가 증가할수록 좌굴강도는 커진다. 즉 섬유보강 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.

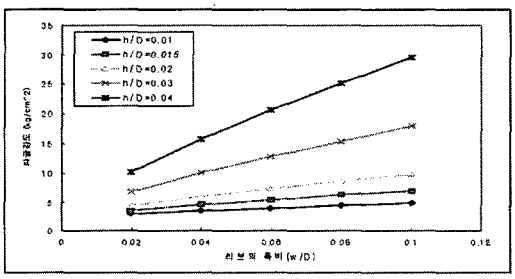

그림 8 w/D-Buckling Strength Relationship (S/D=0.3)

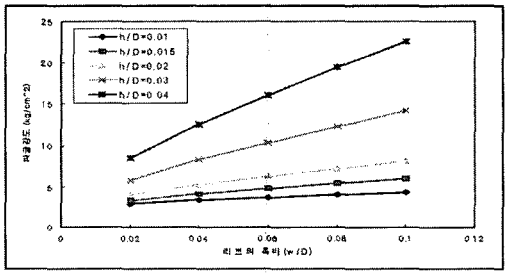

그림 9 w/D-Buckling Strength Relationship (S/D=0.4)

이차모멘트의 증가로 인해 예상된 예상좌굴강도와 유한요소해석을 통해 얻은 해석치는 리브의 폭이 좁으면 거의 일치하는 값을 보여주지만 리브의 폭이 넓어지면 예상좌굴강도에 비해 유한요소 해석값이 작아진다. 그 이유는 리브의 폭이 넓어질수록 실제로 하중을 받는 단면적의 증가로 인해 관에 더 큰 하중이 작용하게 되어 관의 좌굴강도는 작아지지만 이차모멘트값의 변화만을 가지고 예상한 예상좌굴강도는 단면적의 증가분을 반영하지 못하기 때문에 해석치가 예상좌굴강도보다 작은 값을 띠며 리브의 폭이 넓어질수록 그 차는 벌어지는 것으로 판단된다. 리브의 폭 변화에 따른 좌굴강도경향은 높이의 변화에 따른 경향과 유사한 형태를 띠지만 높이에 비해 폭변화에 따른 영향이 작은데 그 이유는 단면적의 증가는 폭보다 높이에 더 큰 영향을 받기 때문이다.

2.4.3 리브의 간격 변화에 따른 유한요소해석

그림에서 보듯이 리브의 간격비(S/D)가 증가할수록, 즉 리브의 간격이 멀어질수록 좌굴강도는 떨어진다. 이차모멘트의 증가로 인해 예상된 예상좌굴강도와 유한요소해석을 통해 얻은 해석치는 어느 정도 차이가 발생하긴 하지만 리브의 높이나 폭 변화에 대한 차이에 비해 작은 값이다. 즉, 리브의 높이와 폭이 일정하다면 리브의 간격변화에 대한 예상좌굴강도와 해석치와의 비는 거의 비슷한 값을 얻을 수 있었다.

리브로 보강된 GFRP 관로의 좌굴형상은 전체좌굴과 국부좌굴이 함께 나타난다. 전체좌굴은 리브로 관을

보강함으로써 방지하고 국부좌굴은 리브의 간격을 조절함으로써 방지한다. 즉, 리브의 간격이 좁으면 좁을수록 관의 좌굴형상은 전체좌굴의 형태를 띠며 리브의 간격이 넓으면 리브와 리브 사이에 국부좌굴이 발생한다. 따라서 리브의 간격은 국부좌굴이 리브를 포함하여 발생하지 않고 리브와 리브 사이에서만 발생하도록 조절하여야 한다. 다음 그림은 리브로 보강된 GFRP 관로의 유한요소해석 결과 얻은 좌굴형상이다. w/D=0.06, S/w=10인 모델의 좌굴 형상은 리브와 리브 사이에 1사이클의 좌굴 형태를 띰으로써 국부좌굴이 발생하지 않은 것을 볼 수 있다. 하지만, w/D=0.06, S/w=15인 모델은 리브와 리브 사이에 2사이클 이상의 국부좌굴이 발생함을 볼 수 있고 이러한 좌굴형상은 피해야한다. 유한요소 해석 결과 리브의 높이와 폭에 따라 약간의 차이는 있지만 대체적으로 리브의 간격비(S/D)가 0.5를 초과했을 때 리브와 리브 사이의 국부좌굴이 발생함을 볼 수 있었다.

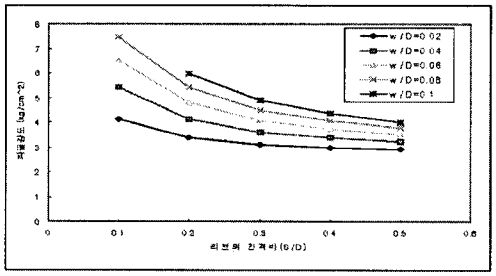

그림 10 S/D-Buckling Strength Relationship (h/D=0.01)

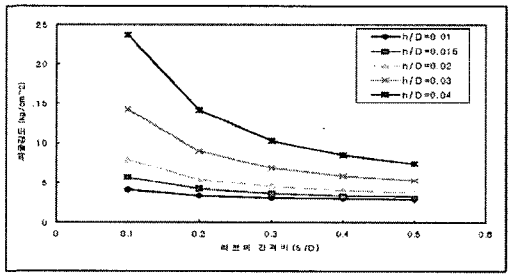

그림 11 S/D-Buckling Strength Relationship (w/D=0.02)

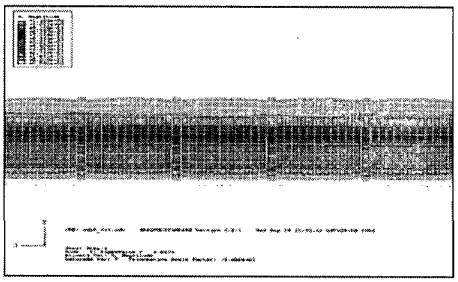

그림 12 좌굴형상 (w/D=0.06, S/w=10, scale factor=50)

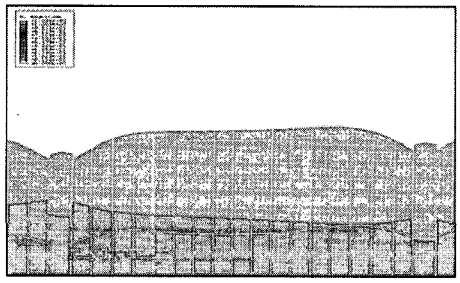

그림 13 좌굴형상 (w/D=0.06, S/w=15, scale factor=300)

2.4.4 강성비 변화에 따른 강도변화

GFRP 관로는 직교이방성 재료로서 유리섬유와 매트릭스, 충진재 간의 조성량과 비율에 따라 원주방향과 길이방향의 강성 값이 변한다. 앞서 해석모델의 검증 부분에서 언급했듯이 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 강성비 변화에 따른 강도변화를 알아보기 위하여 원주방향의 강성은 고정, 길이방향의 강성을 변화시킴으로써 강성비(길이방향 탄성계수/원주방향 탄성계수)에 따른 변화를 해석하였다.

강성비 변화에 따른 좌굴강도를 살펴보면 강성비(길이방향 탄성계수/원주방향 탄성계수)가 클수록 좌굴강도도 높은 것을 알 수 있다. 3차원 좌굴은 길이방향의 강성이 원주방향의 강성과 마찬가지로 줄어들기 때문

에 발생을 하는데 강성비가 커질수록 즉, 길이방향의 강성이 원주방향 강성이 비해 커질수록 좌굴에 저항하는 관의 전체 강성이 커지기 때문에 좌굴강도가 높게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

4. 결론

GFRP 관로를 리브로 보강함으로써 좌굴에 대한 안정성을 향상시키기 위해 단면형상별 유한요소해석을 실시하였고 유한요소해석값을 토대로 정량적인 회귀분석을 통하여 리브로 보강된 직교이방성 재료의 GFRP PIPE의 좌굴강도식을 제안하였다. 그 결과 제안된 식으로부터 얻은 좌굴강도는 유한요소 해석치에 비해 -7.4% ~ 6.7% 범위 내의 오차를 나타내므로 제안식은 타당하다고 판단된다.

$$q_{cr} = \frac{3E \circ I}{R^3(1-\nu^2)} \times \left(\frac{E_L}{E_C}\right)^{0.035} \times \left[\alpha \circ \ln\left(\frac{h}{2R}\right) + \beta\right]\left(\frac{w}{2R}\right)^{\left[\gamma \circ \ln\left(\frac{h}{2R}\right) + \delta\right]} \quad \text{(식 2)}$$

$$\alpha = -0.55\left(\frac{S}{2R}\right) \qquad \left(0.005 \le \frac{h}{R} \le 0.02\right) \quad \text{(식 3)}$$

$$\beta = -2.8\left(\frac{S}{2R}\right) + 1 \qquad \left(0.01 \le \frac{w}{R} \le 0.05\right)$$

$$\gamma = -0.2\left(\frac{S}{2R}\right) + 0.02 \qquad \left(0.05 \le \frac{S}{R} \le 0.25\right)$$

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

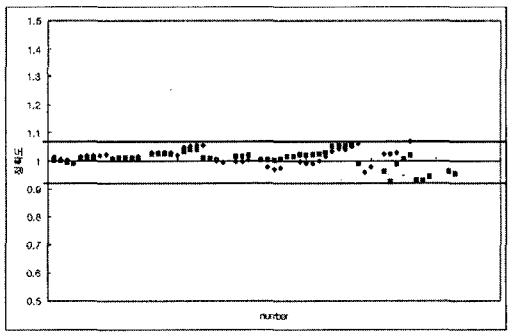

그림 14 제안식의 정확도

감사의 글

본 연구는 『삼성물산(주) 건설부문』의 지원으로 이루어졌으며, 지원기관에 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

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

J. N. Reddy (1997) Mechanics of Laminated Composite Plates, CRC Press

S. P. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger (1959) Theory of Plates and Shells, 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc.

Isaac M. Daniel and Ori Ishai (1994) Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford