

직교 이방성 복합재료로 구성된 파형 관로의 탄성좌굴 특성

Elastic Buckling Characteristics of Corrugated Pipe Made of Orthotropic Composite Material

한 택 희*
Han, Taek Hee

김 태 연**
Kim, Tae Yeon

한 금 호***
Han, Keum Ho

강 영 종****
Kang, Young Jong

Abstract

The elastic buckling strength of a corrugated pipe made of orthotropic material was evaluated. The height and length of a corrugated wave and the thickness of the pipe were considered as factors affecting the buckling strength of the pipe. And also, the ratio of the longitudinal stiffness and transverse stiffness were considered as parameters affecting on the buckling strength of a pipe made of orthotropic material. Buckling strengths of various corrugated pipes with different shapes and stiffness ratio were evaluated by FE analyses. And a formula to estimate the elastic buckling strength was suggested by regression of FE analysis results. Analysis results show that a corrugated pipe has superior buckling strength to a general flat pipe and the suggested formula estimates accurate buckling strength of the corrugated pipe made of orthotropic material.

요 지

본 연구에서는 이방성 재료로 구성된 파형 관로의 좌굴 거동을 분석하였으며, 좌굴거동에 영향을 미치는 변수로서 파형의 높이와 길이, 압거의 직경과 두께가 고려되었다. 또한 이방성 재료의 특성을 고려하여, 길이방향의 강성과 원주방향의 강성도 함께 좌굴거동에 영향을 미치는 인자로서 고려되었다. 다양한 형상의 파형 관로에 대해 유한요소해석을 수행하여 매개변수연구를 하였으며, 유한요소해석 결과를 바탕으로 이방성 재료로 구성된 파형 관로의 좌굴강도를 추정할 수 있는 간략식을 제안하였다. 해석결과, 파형 관로는 일반적인 평탄한 관로에 비해 우수한 좌굴강도를 보였으며, 제안식 또한 유한요소해석 결과에 근접하는 좌굴강도를 보여주었다.

Keywords : Pipe, Buckling strength, Orthotropic, Corrugated

핵심 용어 : 관로, 좌굴강도, 이방성, 파형

* 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 BK연구조교수, 공학박사

** 정희원, 삼환기업 주식회사 대리, 공학석사

*** 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, 공학석사

**** 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수, 공학박사

E-mail : yjkang@mail.korea.ac.kr 02-3290-3317

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2007년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

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 Fig. 1과 같이 부식이 발생하여 녹, 스케일, 박테리아 및 이물질을 발생하게 하여 물의 품질을 비위생적으로 만들며, 내구성을 저하시키는 요인으로도 작용하며, 흙관 및 콘크리트관은 Fig. 2와 Fig. 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. FRP(fiber reinforced plastic, 섬유보강 합성수지) 관로의 경우에는 부식이 발생하지 않고, 고강도의 연



Fig. 1 주철관 내의 부식



Fig. 2 콘크리트 연결관의 함몰



Fig. 3 흙관의 파손, 붕괴

성관으로서 거동하기 때문에 콘크리트 관로나 흙관과 같은 파손이 발생하지 않고, 교체 시공이 편리한 장점이 있다.

본 연구에서는 기존의 관로에서 문제가 되는 부식과 관의 파손의 문제를 해결하기 위하여, 신소재인 FRP를 사용한 지중 암거에 대한 연구를 수행하였다. FRP는 고강도 재료이면서 그 역학적 특성을 매우 다양하게 제작할 수 있고, 시공성이 좋고 경제적이며 내식, 내마모성이 우수해 기존의 건설 재료들에 비해 많은 장점들을 가지고 있다. 한편, 재료의 중량이 줄어들고 강도가 고강도화 됨에 따라 구조물은 더욱 얇은 박판구조로 설계-시공되며, 이에 따라 구조물의 좌굴 문제가 더욱 중요하게 된다. 외국의 섬유 보강 복합재료 관로에 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 치짐에 관한 연구를 수행하였으며, 국내에서는 한택희 등(2003)에 의해 적층구조물의 좌굴거동에 대한 연구가 수행되었다. 이처럼 현재까지 섬유보강 복합관과 같은 적층 구조물에 대한 축방향 압축에 대한 연구가 많이 수행되고 있으나, 파형을 갖는 복합재료 관로의 좌굴 거동에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구의 대상인 이방성 복합재료로 구성된 파형 관로는 재료적으로 신소재를 사용함으로써 강도, 내구성, 내부식성을 향상시키고 구조적으로는 관의 형상을 파형으로 제작함으로써 좌굴에 대한 안정성을 확보할

수 있다. 본 연구에서는 이방성 재료를 갖는 파형관로에 대하여 파형의 높이 및 길이, 복합재료의 방향별 탄성계수 변화에 따른 유한요소해석을 실시하고 정량적, 정성적 영향에 대한 분석을 통하여 회귀식을 이용한 좌굴강도식을 제안하였다.

2. 매개변수 및 해석 모델 검증

등방성 원형 관로의 경우 탄성 좌굴 거동에 영향을 주는 변수는 반경과 두께의 비로 충분히 정의 할 수 있으나 직교 이방성 파형 관로의 경우 길이 방향과 원주 방향의 탄성계수 비(E_2/E_1), 두께/반경 비(t/R), 파고/반경 비(h/R), 파폭/파고 비(w/h) 등 여러 가지 변수로 정의 할 수 있다. 본 연구에서는 이런 여러 변수에 따른 좌굴강도의 변화를 관찰하고 분석하여, 직교 이방성 재료를 사용한 파형 관로의 좌굴강도식을 제안 하고자 한다.

본 연구의 유한요소해석에 사용한 프로그램은 ABAQUS 6.5-1이며, 8절점 쉘요소를 사용하였다. 유한요소해석 시 관로는 Fig. 4와 같이 1/4원으로서 표현하였으며, 경계조건은 Table 1에 정리된바와 같이, line 1, 2에서 원주방향의 변위를 구속하고 길이방향의 회전을 막아 주었다. line 3, 4에서는 길이방향의 변위만을 구속하였다. 하중은 면에 수직으로 등분포하게 작용하였다. 해석 프로그램 검증결과 좌굴강도는 174.32 kPa로서, Timoshenko와 Gere(1961)의 좌굴강도식

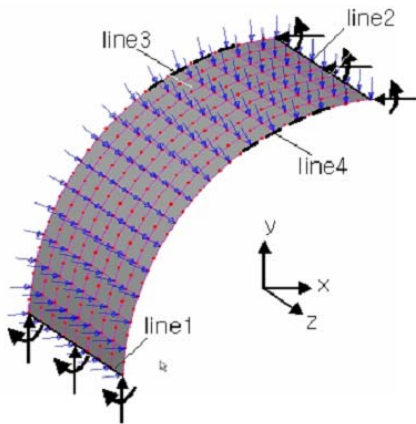


Fig. 4 해석 모델의 경계조건

Table 1 각 방향별 경계조건

경계조건	line 1	line 2	line 3	line 4
병진	x	자유	고정	자유
	y	고정	자유	자유
	z	자유	자유	고정
회전	x	자유	자유	자유
	y	자유	자유	자유
	z	고정	고정	자유

에 의한 좌굴강도 173.24kPa과의 차이가 0.66%로 신뢰할 수 있는 수준이라 할 수 있으며, 직교 이방성 파형 관로의 해석 시에 여기서 검증된 경계조건과 하중 조건을 사용 하였다.

2.1 매개 변수의 결정

매개변수 결정시 관의 반경(R)은 500mm로 고정하였으며, 관의 두께(t)와 파고(h), 파폭(w)을 변화 시키면서 해석을 수행 하였다. 관의 단면 형상 제원은 Fig. 5에 나타나 있다.

또한, 직교 이방성의 특징의 영향을 분석하기 위하여, 길이방향의 탄성계수(E_2)와 원주방향의 탄성계수(E_1) 비를 변화 시켰다. 길이방향과 원주방향에 대한 정의는 Fig. 6과 같다. 관의 두께와 반경의 비(t/R)는 0.012~0.02의 범위에서 까지 변화시켰으며, 파고/반경 비(h/R)는 0.02~0.06의 범위에서 변화시키고, 파폭과 파고의 비(w/h)는 2~6까지 변화 시켰다. 또한 길이방향의 탄성계수와 원주방향의 탄성계수 비(E_2/E_1)는 0.4~1.2의 범위에서 변화 시키면서 해석을 수행하여 방향별 탄성계수 비의 변화에 따른 좌굴

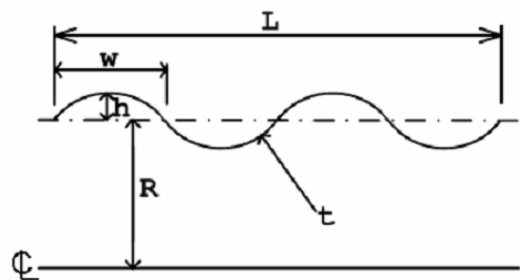


Fig. 5 파형관의 단면 형상 및 제원

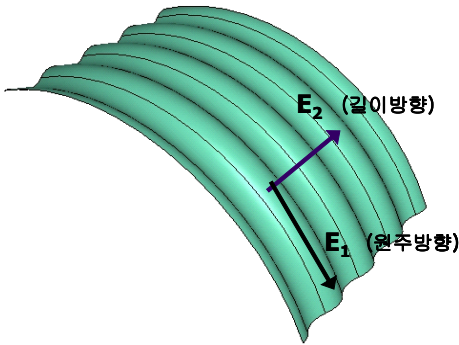


Fig. 6 길이방향과 원주방향의 정의

Table 2 해석 시 적용된 매개변수

R(mm)	t(mm)	h(mm)	w(mm)					
500	6	10	20	30	40	50	60	
	7	15	30	45	60	75	90	
	8	20	40	60	80	100	120	
	9	25	50	75	100	125	150	
	10	30	60	90	120	150	180	

강도의 변화를 분석하였다. Table 2에 해석 시 적용된 매개변수 제원을 나타내었다. 각각의 변수를 적용하여 625개의 모델에 대해 해석을 수행하였다.

2.2 수렴도 검증

유한요소해석의 결과치는 해석모델의 요소 수에 따라 상당한 차이를 보인다. 따라서 정해를 알고 있는 모델에 대하여 유한요소의 개수별 해석 결과의 비교를 통하여 적당한 유한요소의 개수를 결정하는 것이 타당하다. 먼저 요소의 수에 따른 원주방향의 해석결과의 수렴도를 검토하였으며, 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

원주 방향으로는 요소의 수가 48개 이상일 때 수렴하였으며, 길이 방향으로는 파형의 수(full sine = 2w)에 따른 수렴도를 검증하였으며, Fig. 8과 같은 결과를 나타내었다.

길이 방향으로는 파형(2w)의 수가 16개 이상일 경우에는 파형에 원주방향의 단면2차모멘트 증가로 인해, 길이방향과 원주방향의 강성 차이가 존재함에 따라 발생하는 3차원 좌굴이 발생하였는데, 이 경우에는

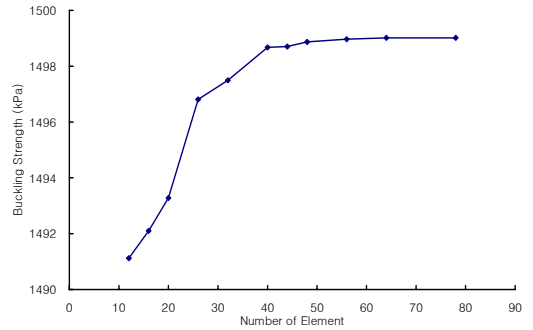


Fig. 7 원주방향 수렴도

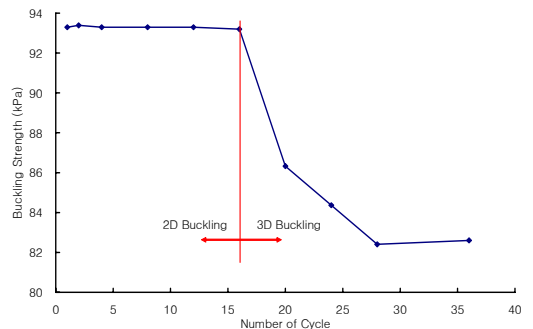


Fig. 8 길이방향 수렴도

관의 길이방향에 따라 관의 단면 형상이 변화하게 된다.

파형의 수가 16개 이하일 경우에는 길이방향에 따라 단면의 형상이 일정한 2차원 좌굴이 발생하였다. 또한 2차원 좌굴 범위에서는 길이에 관계없이 좌굴강도가 일정함을 알 수 있다. 본 연구에서는 2차원 좌굴의 범위 내에서 연구를 수행 하였다.

Fig. 9와 Fig. 10은 각각 관의 2차원 좌굴형태와 3차원 좌굴형태를 보여준다.

3. 유한 요소 해석 결과

3.1 두께 변화(t/R)에 따른 좌굴강도

직교 이방성 재료로 구성된 파형관의 두께 변화에 따른 탄성 좌굴강도의 변화를 알아보기 위하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 관의 두께와 반경의 비는 0.012~0.02의 범위에서 연구를 수행하였으며, 본 연구에서는

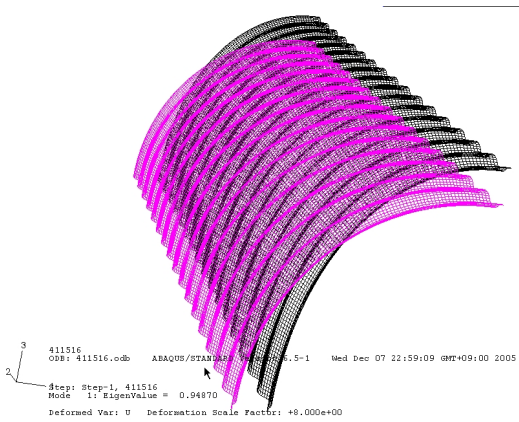


Fig. 9 관의 2차원 좌굴형상(16 cycles)

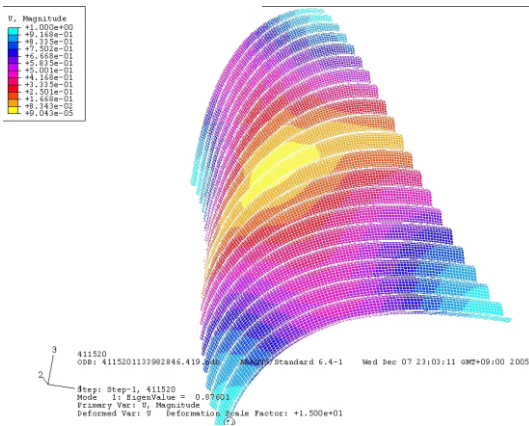


Fig. 10 관의 3차원 좌굴형상(20 cycles)

파의 형상을 Sine 곡선을 사용하지 않고, 호의 형상을 사용하여 해석 하였다. 또한 원주방향의 탄성계수(E_1)는 11491.9MPa를 적용하였으며, 길이 방향의 탄성계수는 원주방향 탄성계수의 0.4배에서 1.2배까지 변화시켰다. 포아송 비(ν)는 0.112를 사용하였다.

해석 결과, 좌굴 모드는 모두 2차원 좌굴 형태로 나타났으며, 파형관의 좌굴강도는 두께(t)에 비례함을 알 수 있었다. Fig. 11과 Fig. 12는 관로의 두께 변화에 따른 좌굴강도의 변화를 나타낸 그림이다.

3.2 파고 변화(h/R)에 따른 좌굴강도

파형관에서 파의 높이(h)와 관의 반경(R)의 비가

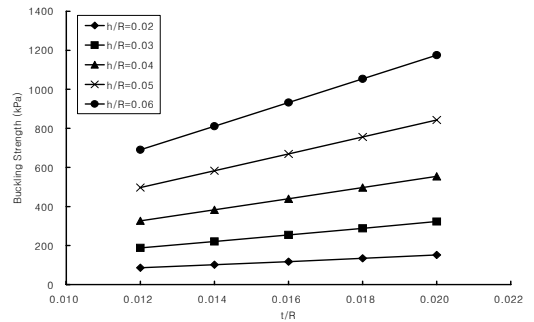


Fig. 11 두께 변화에 따른 좌굴강도($w/h=3$, $E_2/E_1=0.4$)

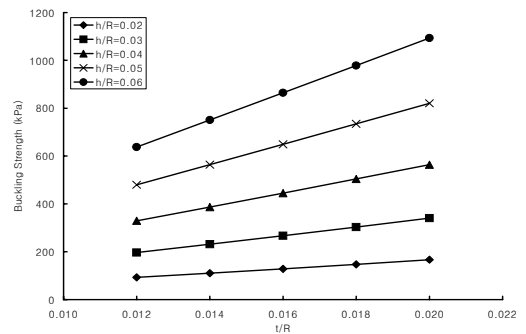


Fig. 12 두께 변화에 따른 좌굴강도($w/h=6$, $E_2/E_1=1.0$)

0.02~0.06인 범위에서 유한요소 해석을 수행하였을 때, 파형관의 좌굴강도는 h/R 의 누승에 비례함을 알 수 있었다. 또한 파의 높이가 일정 할 때, 두께가 커짐에 따라 좌굴강도가 증가하고, 파폭이 넓어짐에 따라 좌굴강도는 감소함을 알 수 있다. Fig. 13과 Fig. 14는 파고의 변화에 따른 이방성 재료로 구성된 파형관의 좌굴강도의 변화를 보여준다.

3.3 파의 곡률 변화(w/h)에 따른 좌굴강도

파형관에서 파의 폭(w)과 파의 높이(h)의 비는 파의 곡률을 반영하며, w/h 를 2~6의 범위에서 유한요소 해석을 수행하였을 때, 파형관의 좌굴강도는 w/h 의 누승에 반비례함을 알 수 있었다.

Fig. 15와 Fig. 16은 파형의 곡률의 변화에 따른 이방성 재료로 구성된 파형관의 좌굴강도의 변화를 보여준다.

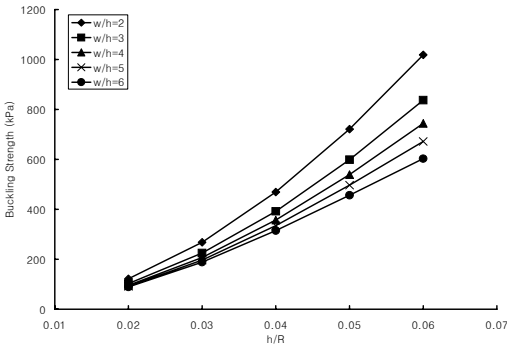


Fig. 13 파고 변화에 따른 좌굴강도($t/R=0.012$, $E_2/E_1=0.8$)

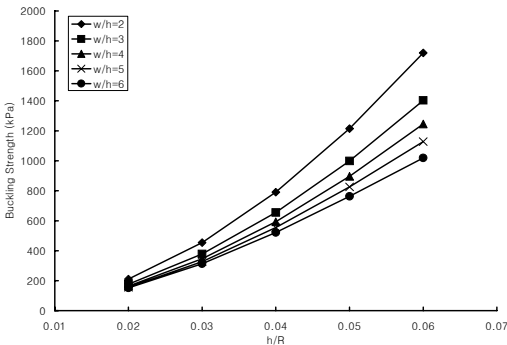


Fig. 14 파고 변화에 따른 좌굴강도($t/R=0.018$, $E_2/E_1=1.2$)

3.4 탄성계수 비(E_2/E_1)에 따른 좌굴강도

직교 이방성이 좌굴강도에 미치는 영향을 분석하고자 길이 방향의 탄성 계수(E_2)와 원주방향의 탄성계수(E_1)의 비를 0.4에서 1.2까지 변화 시키면서 좌굴 해석을 수행 하였다. 해석 결과, 길이 방향과 원주방향의 탄성계수가 같을 경우 즉, 등방성인 경우에 대해 좌굴강도가 탄성 계수 비에 일정한 경향으로 영향을 받음을 알 수 있었다.

탄성계수의 비(E_2/E_1)가 0.4일 때 좌굴강도가 등방성인 경우에 비해 79%정도로 나타났으며, 0.6일 때 88%, 0.8일 때 95%, 1.0일 때 100%, 1.2일 때 104%로 나타났다. Fig. 17과 Fig. 18은 탄성계수 비의 변화에 따른 좌굴강도를 보여준다. 탄성계수의 비에 따라 좌굴강도가 탄성계수 비의 약 0.25배쯤에 비례함을 알 수 있다.

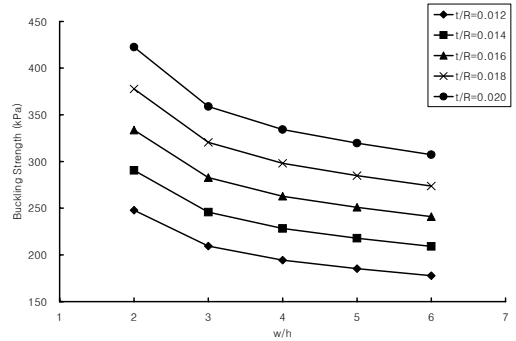


Fig. 15 파의 곡률 변화에 따른 좌굴강도($h/R=0.03$, $E_2/E_1=0.6$)

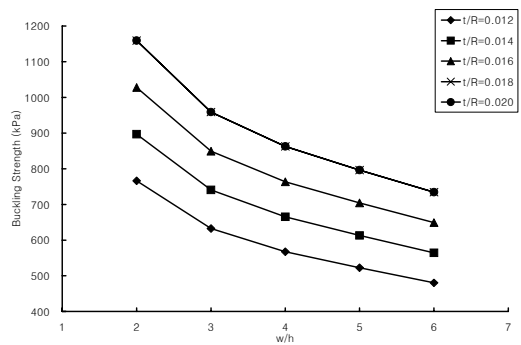


Fig. 16 파의 곡률 변화에 따른 좌굴강도($h/R=0.05$, $E_2/E_1=1.0$)

4. 해석 결과 분석

직교 이방성 재료로 구성된 파형 관로의 매개변수별 유한요소 해석을 통하여 단면형상별 좌굴강도와 경향을 회귀분석을 통하여 정량적으로 분석하였다. Timoshenko와 Gere(1961)가 제시한 좌굴강도식을 기본으로 단면형상에 관한 형상 보정 계수를 회귀분석을 통하여 추가하였고 먼저, 등방성일 때(탄성계수 비 = 1)의 파형 관로의 좌굴강도식의 제안과 정확도를 검증한 후에 탄성계수 비의 변화에 대한 계수를 추가하여 직교 이방성 재료로 구성된 파형 관로의 좌굴강도 (q_{cr})을 식 (1)과 같이 제안하였다. 각 변수의 정의는 식 (2) 및 식 (3)과 같으며 매개변수의 범위는 식 (4)~식 (6)과 같다. 식 (1)에서 각각의 계수 항은 무차원으로 표현되며, 좌굴강도는 원주방향의 탄성계수와 같은 단위를 갖게 된다.

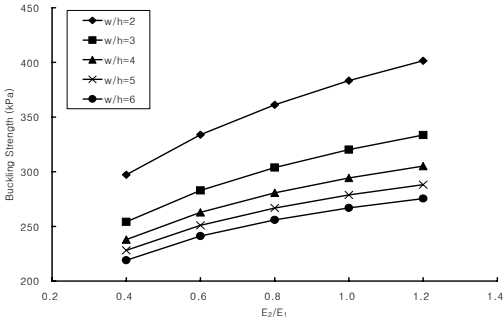


Fig. 17 탄성계수 비에 따른 좌굴강도(h/R=0.3, t/R=0.016)

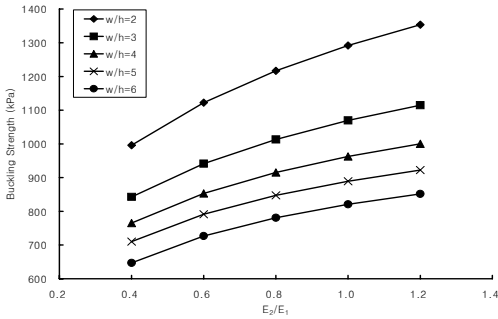


Fig. 18 탄성계수 비에 따른 좌굴강도(h/R=0.5, t/R=0.020)

$$q_{cr} = \alpha \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{E_1}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{R} \right)^\beta \left(\frac{t}{R} \right)^{1.06} \quad (1)$$

$$\alpha = 5.9309 \left(\frac{w}{h} \right)^{0.0517} + 8.2459 \left(\frac{w}{h} \right)^{-0.9483} - 0.7157 \left(\frac{w}{h} \right)^{1.0517} \quad (2)$$

$$\beta = -0.0156 \left(\frac{w}{h} \right)^2 + 0.1376 \left(\frac{w}{h} \right) + 1.8152 \left(\frac{w}{h} \right)^{-0.1381} + 0.0625 \quad (3)$$

$$0.012 \leq \frac{t}{R} \leq 0.02 \quad (4)$$

$$0.02 \leq \frac{h}{R} \leq 0.06 \quad (5)$$

$$2 \leq \frac{w}{h} \leq 6 \quad (6)$$

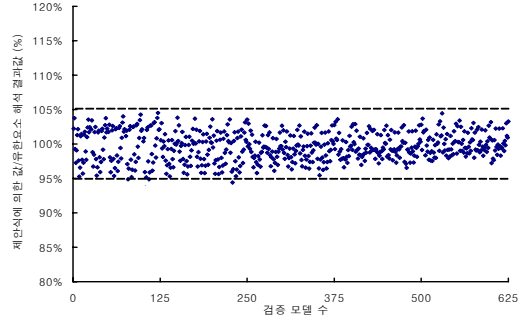


Fig. 19 제안식의 정확도

제안된 식을 이용하여 얻은 단면형상 및 탄성계수 비에 따른 좌굴강도와 실제 유한요소해석을 통하여 얻은 좌굴강도를 비교하여 그래프로 나타내었다. 그 결과 제안된 식으로부터 얻은 좌굴강도는 유한요소해석 결과와 비교하여 5% 범위 내의 오차를 나타내어 제안식은 타당하다고 판단된다. Fig. 19는 유한요소 해석에 대한 제안식의 정확도를 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 FRP와 같은 직교 이방성 재료로 구성된 관의 형상을 파형으로 함으로써 관의 좌굴강도를 향상시키고, 파형관의 단면형상 및 관의 길이방향과 원부방향의 탄성계수 비에 따라 파형관의 유한요소해석을 실시하였고 결과 분석을 통하여 다음과 결론을 얻을 수 있었으며, 회귀분석을 통하여 좌굴강도식을 제안하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같으며, 본 좌굴강도식을 적용한다면, 현재 적용성이 확대되고 있는 이방성 복합재료 관로의 설계시 이방성 재료의 특성을 고려한 설계를 가능하게 하여, 경제적인 시공을 할 수 있을 것으로 판단된다.

- 1) 파형관의 두께(t)가 증가함에 따라 좌굴강도도 함께 증가하며, 관의 두께와 반경의 비(t/R)에 따라 선형으로 증가하는 형태를 보인다.
- 2) 파형관의 좌굴강도는 파고의 높이가 커짐에 따라 좌굴강도가 증가하며, 파고와 관의 반경의 비(h/R)의 누승에 비례함을 알 수 있었다.

- 3) 파형관에서 파의 폭(w)과 파의 높이(h)의 비는 파의 곡률을 반영하며, w/h가 증가하면 파의 곡률이 작아지게 되며, 파형관의 좌굴강도는 w/h의 누승에 반비례함을 알 수 있었다.
- 4) 직교 이방성 재료로 구성된 파형관의 좌굴강도는 길이 방향과 원주방향의 탄성계수가 같을 경우 즉, 등방성인 경우에 대해 좌굴강도가 탄성 계수 비에 일정한 경향으로 영향을 받음을 알 수 있었으며, 좌굴강도는 탄성계수 비의 약 0.25제곱에 비례함을 알 수 있었다.
- 5) 제안된 좌굴강도식은 유한요소해석 결과와 비교하였을 때, 5% 이내의 오차 범위를 가지며, 해석 결과에 근접하는 값을 산출하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 한택희, 나태수, 김종현, 강영종, "적층각 변화를 고려한 등분포하중을 받는 원통형 적층구조물의 좌굴민감도", 대한토목학회 학술발표 논문집, 2003, pp. 481-486.
2. Dutta, P.K., Hui, D., "Creep Study of FRP Composite Rebars for Concrete", Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Aug., 1997.
3. Timoshenko, S.P., Gere, J.M., "Theory of Elastic Stability", 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., 1961.
4. Simitzes, G.J., Shaw, D., Sheinman, I., "Stability of Imperfect Laminated Cylinders: A Comparison between Theory and Experiment", AIAA Journal, Vol. 23, 1985, pp. 1086-1092.
5. Tennyson, RC., "Buckling of Laminated Composite Cylinders", Composites, 1975, pp. 17-24.

(접수일자 : 2006년 7월 10일)