채널단면의 기하학적 형상변화에 따른 캔틸레버 적층구조물의 안정성 연구

Stability of Cantilevered Laminated Composite Structures with Open Channel Section by Geometrical Shape Variations

박 원 태* 천 경 식** 손 병 직***

Park, Won-Tae Chun, Kyoung-Sik Son, Byung-Jik

Abstract

In this paper, the stability of cantilever composite laminated structures with open channel section is studied. This paper deals with the buckling behavior under the variation of the geometrical shape (length ratio, crank angle in the open channel section), the fiber reinforced angle, and so on in order to offer a effective and reliable design data. Also, sensitive analyses are carried out on the stability by the interaction of design factors. Based on this fact, the proper channel section and lamination scheme of composite material cantilever structures are considered in the engineering aspect.

요 지

본 연구에서는 채널단면을 갖는 캔틸레버 복합적층 구조물의 안정성에 다루었다. 보다 합리적이고 효율적인 설계의 기초자료를 제시하고자 채널단면의 길이비와 곡절각도 등과 같은 기하학적 형상변화와 화이버의 보강각도에 따른 좌굴거동을 분석하고, 그에 따른 상호작용에 의한 안정성을 파악하였다. 이를 근거로 캔틸레버 복합적층 구조물의 적절한 채널단면 및 복합재료의 적층구조형식 등을 공학적 측면에서 고찰하고 제시하였다.

Keywords : open channel section, geometrical shape, composite material, buckling behavior, stability

핵심 용어 : 채널단면, 기하학적 형상, 복합재료, 좌굴거동, 안정성

* 정회원, 천안공업대학 토목과 부교수, 공학박사

** 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 한국표준과학연구원 환경안전계측센터, 공학박사

E-mail : pwtae@dragon,cntc.ac.kr 041-550-0355

• 본 논문에 대한 토의를 2004년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2004년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

부재가 압축력을 받았을 때의 강도는 부재를 구성하는 판요소의 좌굴에 의해 영향받을 가능성이 있다. 좌굴이란 부재가 어느 한계치 이상의 압축력을 받게되면 부재의 형상이 변화되어 내하력을 상실하는 현상으로써 전체좌굴과 구조계를 구성하는 부재의 국부좌굴로 구분된다. 어느 경우나 국부좌굴이 전체좌굴에 선행되지 않도록 하는 것이 중요하다(천경식 등, 2003). 즉, 판요소가 먼저 좌굴함으로써 기능이 상실되어 부재 전체의 좌굴을 유도하게 되거나, 판의 좌굴이 응력의 재분배를 일으키고 부재 전체의 내하력에 영향을 미치는 거동을 생각할 수 있다. 따라서 구조물의 기하학적 형상변화에 따라 발생할 수 있는 여러 가지 문제점 중 압축좌굴이 설계시 우선적으로 고려되어야 한다.

특히, 채널단면을 갖는 구조물은 수직으로 하중이 작용하면 단순히 휘어지는 평판의 구조적인 약점을 보완하기 위하여 평판을 임의의 각도로 부착시켜 강성을 높인 절판형식의 구조물로 볼 수 있다. 이러한 절판은 선박, 빌딩 및 교량 뿐만 아니라 구조물을 연속적으로 결합시켜 큰 공간을 확보하는데 널리 사용되고 있다. 그러나 그 사용성에 비하여 좌굴거동 연구가 미비한 실정이다. 또한 최근에 대두되고 있는 복합신소재는 그 자체의 높은 비강성, 비강도와 내구성 등의 특징을 갖고 있어, 재료의 역학적인 성질에서 발생하는 구조적인 단점을 보완하여 필요한 강도와 강성을 갖도록 복합적으로 배치함으로써 구조적인 효율성을 높일 수 있다. 최근에는 국내에서 복합재료를 이용한 교량 적용용 구조데크가 개발되어 공사현장 가교에 적용되었고(이성우 등, 2001), 유리섬유 보강 폴리에스터와 비닐에스터 폴리머 복합재료를 이용하여 수적층된 FRP패널과 파형 FRP부재로 구성된 고강도 복합신소재 교량을 법정도로에 국내최초로 건설하기도 하였다(지효선 등, 2002). 이러한 시점에서 채널 단면을 갖는 복합재료 캔틸레버 구조물의 좌굴거동연구는 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 절점당 8개의 자유도를 갖는 평판/쉘 유한요소를 사용하여 채널단면을 갖는 캔틸레버 복합재료 구조물의 전반적인 좌굴거동특성을 파악하고자 한다. 보다 합리적이고 효율적인 설계의 기초자료를 제시하고자 채널단면의 길이비와 곡절각도 등과 같은 기하학적 형상변화와 화이버의 보강각도에 따른 좌굴거동을 분석하고, 그에 따른 상호작용에 의한 거동특성을 파악하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 기하학적 형상 및 재료물성치

Fig. 1은 본 논문에서 연구하고자 하는 채널단면을 갖는 복합재료 구조물을 이상화한 모델이다. y_1, y_2, y_3는 채널단면을 구성하는 각 평판의 y축 방향 길이이며, 해석상의 편의성을 위하여 y축 방향 전체길이의 합를 b로 정의하였다. L은 x축 방향 길이를 의미하고, t는 두께이다. 곡절각도 α, β와 곡절위치 y_i를 조절하여 다양한 기하학적 단면형태에 따른 좌굴거동을 파악할 수 있다. 우선, 본 연구에서는 토목 및 건축 구조물에서 많이 사용되는 직사각형 채널단면을 갖는 구조물을 중점적으로 연구하였다.

해석모델의 재료 물성치는 Table 1과 같이 직교이방성 재료를 사용하였으며, 각각 동일한 두께와 재료

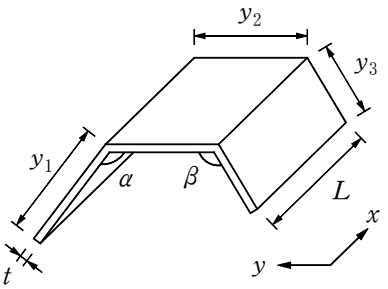


Fig. 1 해석모델의 기하학적 형상

Table 1 복합재료의 물성치

구분	M1	M2
E_2	100	100
E_1/E_2	25	40
G_{12}/E_2	0.5	0.6
G_{23}/E_2	0.2	0.5
G_{13}/E_2	0.5	0.6
ν_{12}	0.25	

를 가진 층을 임의의 보강각도로 적층시켰다. E는 탄성계수를, G는 전단탄성계수를, ν는 포아송비를 의미한다.

2.2 유한요소 모델

채널단면을 갖는 복합재료 구조물의 좌굴거동을 해석하는데 영향을 미칠 수 있는 요인으로는 구조물의 경계조건, 재료의 성질, 하중분배 등으로 판단되며, 이러한 요인들의 영향을 비교적 근사하게 구현하는 방법으로서 유한요소에 따른 모델링이다. 정확한 좌굴거동을 파악하기 위하여 면내방향 압축하중을 받는 모델에 적합한 평판/쉘 요소를 사용하였다. 본 연구에서 적용한 4절점 평판요소는 고차전단변형이론에 의해 각 절점당 7개의 자유도를 갖는다. 이 요소에 가정된 변형률장(Shi et al., 1999)을 도입함으로써 거동을 개선할 수 있으며 그와 관련된 사항은 식 (1)과 같다.

$$e_b = \begin{bmatrix} 1 & \xi & \eta & \xi\eta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \xi & \eta & \xi\eta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \xi & \eta \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$e_m = \begin{bmatrix} 1 & \eta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \xi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$$e_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

$$e_{hs} = \begin{bmatrix} 1 & \eta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \xi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

여기서, 아랫첨자 b, m와 s는 각각 휨, 면내, 전단에 관한 항을 의미하며, hs는 고차전단변형에 의해 발생한 항을 의미한다. 위에 제시된 가정된 변형률장은 평판요소에서 발생하는 계급의 부족과 잠김현상을 제거하고, 요소의 안정성을 확보할 수 있다. 즉, 전단에너지에 대해 정상적분을 수행함으로써 가상의 제로에너지모드(spurious zero energy mode)와 전단잠김현상을 제거할 수 있다.

$$[K_{\phi z}] = k_{inp} EhA \begin{bmatrix} 1 & -1/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 1 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 1 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & -1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

평판/쉘 요소는 평판요소에 면내 회전각 자유도(ϕ_z)를 추가함으로써 구성할 수 있다(Zienkiewicz and Taylor, 1991). 7개의 자유도를 갖는 평판요소에 의해 작성된 국부 강성행렬 및 국부 기하학적행렬에 식 (2)에 나타낸 면내 회전각 자유도에 의한 행렬을 추가함으로써 전체 강성행렬 및 기하학적행렬을 구성할 수 있다. 결국 본 연구에서 사용하는 평판/쉘 요소의 절점당 자유도는 8개를 갖는다. 여기서, h는 전체 구조물의 두께이며 A는 면적을 의미한다. k_{inp}는 면내강성 변수로 보통 0.02값을 사용한다.

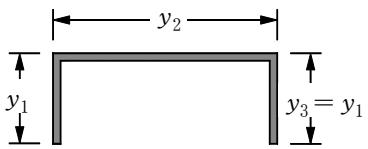
3. 결과 분석

3.1 채널단면의 길이변화

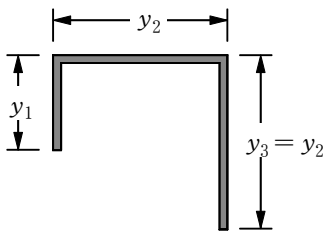
본 절에서는 채널단면의 길이변화에 따른 좌굴하중 분포를 비교하였다. 해석모델은 y축 방향의 곡절된 ㄷ형상의 채널단면을 갖는 길이 L인 캔틸레버 기둥으로 볼 수 있다. 사용한 재료는 M1이고, 보강각도는 $[0/90/0]$이다. 채널단면 변화를 위한 매개변수를 설정하고자 기하학적 형상을 결정하는 변수들중 길이 $L=40$, 폭 $b=20$, 두께 $t=1$으로 고정시키고, Fig. 2와 같이 두 가지 경우에 대해 좌굴해석을 수행하였다.

Model A와 Model B는 채널단면의 기하학적 형상을 결정하는 변수를 최소화하고자 각각 $y_1 = y_3$와 $y_2 = y_3$으로 놓고, y_2와 y_1의 길이를 변화시켰다.

Model A에서 y_1, y_3는 매개변수인 y_2와 상수인 b에 의해 식 (3.1)과 같이, Model B에서 y_2, y_3은 매개변수인 y_1과 상수인 b에 의해 식 (3.2)와 같이 결정된다. 식 (3.1)과 (3.2)에서 각각 y_2와 y_1은 2에서 16까지 2씩 증가시켰다.



Model A



Model B

Fig. 2 길이비에 따른 채널단면

$$y_1 = y_3 = \frac{1}{2}(b - y_2), \quad \chi = \frac{y_1}{y_2} \tag{3.1}$$

$$y_2 = y_3 = \frac{1}{2}(b - y_1), \quad \chi = \frac{y_2}{y_1} \tag{3.2}$$

Fig. 3과 4는 각각 Model A와 Model B의 길이 L과 채널단면의 기하학적 형상변화에 따른 무차원 좌굴하중을 비교하여 나타낸 것이다. 무차원 좌굴하중은 $\overline{N}_{cr} = N_{cr} b^2 / E_2 t^3$에 의해 표시하였으며, y축 방향의 길이비인 χ는 식 (3.1)과 (3.2)에 이미 정의하였다.

Model A의 채널단면 변화에 따른 좌굴하중의 분포경향을 통해 $\chi = 0.5$ 즉, y_2의 길이가 y_1의 길이의 2배가 될 때 큰 좌굴하중을 얻을 수 있어 보다 안정적이다. Model B는 Model A와는 달리 중심축을 기준으로 채널단면이 비대칭, 대칭 단면으로 구성된 경우의 좌굴하중 분포경향을 나타낸 것으로 $\chi = 1.0$ 즉, y_1의 길이가 y_2의 길이와 같을 때 큰 좌굴하중을 얻을 수 있다. 하지만 L/b가 커질수록 좌굴에 대한 최적의 길이비는 1.0에서 2.0으로 점차 이동하는 것을 볼 수 있다. 채널단면의 길이비 변화에 따른 좌굴

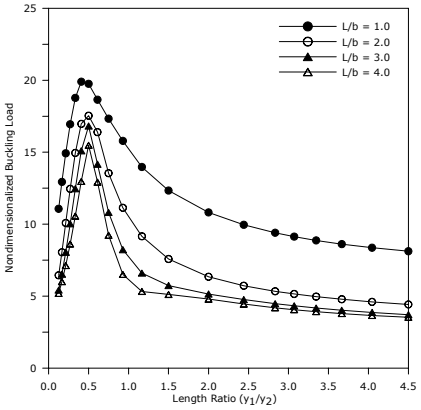


Fig. 3 Model A의 무차원 좌굴하중

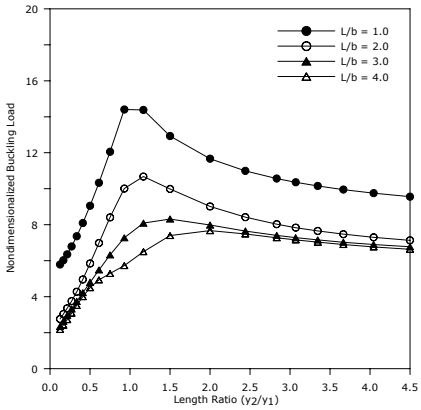


Fig. 4 Model B의 무차원 좌굴하중

하중의 최대·최소의 차이는 Model A의 경우 $L/b = 1$에서는 59.20%, $L/b = 2$에서는 74.77%, $L/b = 3$에서는 77.92%를 나타내고 있다. 이로써 형상비가 클수록 채널단면의 길이비 변화에 따른 좌굴하중이 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

3.3 화이버 보강각도의 변화

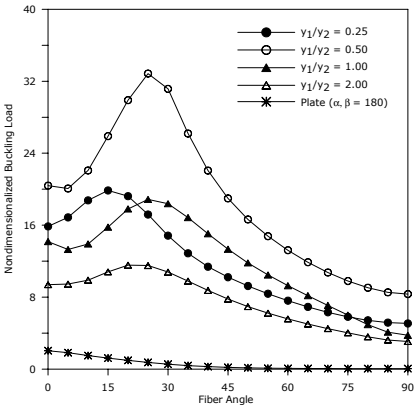
본 절에서는 화이버 보강각도에 따른 구조물의 좌굴거동 특성을 알아보고자 한다. 복합재료의 적층구조는 화이버의 보강각도에 따라 전체적인 강성이 달라지는 비등방성 성질을 갖게 되므로 역학적인 거동을 예측하기에 복잡하다.

해석모델은 캔틸레버 절판 구조물로서 사용한 재료는 M2이고, 적층조건은 4개층을 순서대로 적층한 $(\psi/-\psi/-\psi/\psi)$이다. 기하학적 형상은 길이 $L=40$, 폭 $b=20$, 두께 $t=1$으로 고정시키고, 채널단면은 앞 절의 해석결과에 근거하여 Fig. 2에 나타낸 채널단면의 길이비 $\chi=0.5\sim2.0$에 한하여 보강각도를 5^o씩 증가시키면서 해석을 수행하였다.

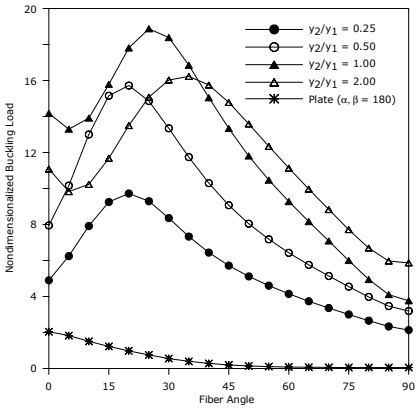
Fig. 5는 채널단면의 길이비 χ와 화이버 보강각도에 따른 무차원 좌굴하중 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 Model A와 Model B의 좌굴하중은 각각 $\chi=0.5$와 1.0인 경우 보강각도 25^o에서 가장 크게 발생하고 있다. 앞서 Fig. 3과 4의 결과분석을 통해 길이비가 증가하면서 점차 좌굴하중이 감소하는 것을 이미 알고 있지만, 이와 같은 분포는 임의의 보강각도에서 다른 경향을 나타낸다.

즉, Model A는 보강각도 80^o이상에서 $\chi=1.0$보다 0.25에서, Model B는 보강각도 40^o이상에서 $\chi=2.0$에서 큰 좌굴하중을 나타내고 있다. 대체적으로 채널단면이 비대칭으로 구성된 Model B는 Model A와 비교하여 화이버 보강각도에 따라 민감하게 반응하며, 특히 보강각도 15^o와 45^o사이에서 다양한 거동분포를 보이고 있다. Model B는 한쪽변의 길이가 다른 변에 비하여 길어지면서 국부적으로 취약해지기 때문으로 사료된다.

추가적으로, 평판$(\alpha,\beta=180^o)$의 좌굴해석을 수행하였다. 그 결과 좌굴하중은 채널단면을 갖는 구조물$(\alpha,\beta=90^o)$과 비교하여 보강각도가 커질수록 차츰 감소하는 고른 분포를 보인다. 이는 면내하중으로 저항하도록 배치한 강축보다 비등방성 평판구조물이 곡절되면서 기하학적 형상 및 보강각도에 의한 상호작용으로 강성의 변화가 평판과는 다르게 발생함을 의미한다. 따라서 화이버 보강각도뿐만 아니라 곡절각도 또한 중요한 고려사항이 되어야 한다.



(a) Model A



(b) Model B

Fig. 5 보강각도에 따른 무차원 좌굴하중

Table 3 길이비에 따른 무차원 좌굴하중

L/b		χ					
		0.222	0.500	1.077	2.000	3.000	6.000
1.0	Model A	8.1205	10.8187	15.7880	19.7534	18.7741	12.9370
	Model B	9.5578	11.6697	14.4035	9.0531	7.3588	6.0254
2.0	Model A	4.4244	6.3473	11.1391	17.5370	14.9498	8.0497
	Model B	7.1328	9.0138	10.0085	5.8451	4.2730	3.0337
3.0	Model A	3.7146	5.1461	8.2312	16.8229	12.4644	6.5270
	Model B	6.7762	7.9807	7.2721	4.7940	3.7373	2.6282

3.4 곡절각도의 변화

곡절각도에 의한 좌굴거동을 분석하고자 해석모델의 기하학적 형상은 길이 $L=10$, 폭 $b=10$, 두께 $t=1$, $y_1=y_2=y_3=b/3$ 이고 재료 M2를 적용하였다. 이때 y축 방향의 길이비에 대한 영향을 제거하고자 동일하게 설정하였다. Fig. 2와 같은 조건에서 곡절각도에 의한 영향은 보다 많은 매개변수 연구가 이뤄져야 할 것이며, 이 부분은 차후 연구과제로 남겨둔다. Fig. 6과 같이 곡절각도 β를 90^o로 고정시키고 α을 변화시키거나(Model C), α와 β을 동일하게 변화시키는(Model D) 두 가지 모델에 대해 좌굴해석을 수행하였다.

Fig. 7은 곡절각도 변화에 따른 무차원 좌굴하중을 나타낸 것이다. 적층배열에 따라 좌굴하중의 값은 서로 차이가 있지만 분포경향은 곡절각도의 변화에 따라 유사하게 나타나고 있다.

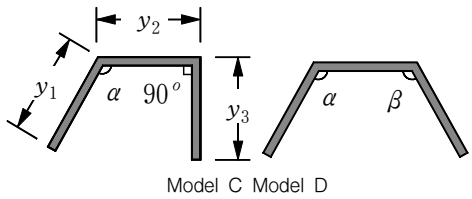


Fig. 6 곡절각도에 따른 채널단면

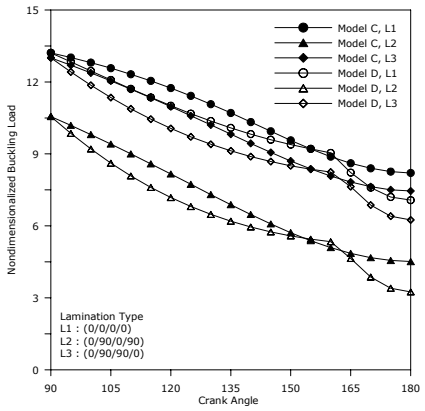


Fig. 7 곡절각도에 따른 무차원 좌굴하중

일방향 L1, 역대칭 L2, 대칭 L3 모두 Model C와 Model D의 거동차이가 유사하게 분포하며, 축방향(x축)의 면내거동이 구조전체의 거동에 지배적인 영향을 미치므로 그 방향으로 보강될수록 좌굴하중이 크게 발생한다. 전반적으로 곡절각도 $\beta=90^o$이고 α를 변화시킨 Model C의 비대칭 단면이 Model D의 대칭단면보다 안정성을 보다 확보할 수 있는 것으로 나타난다.

다음은 임의의 곡절각도와 보강각도의 변화가 구조물의 안정성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 적층조건은 대칭 $(\phi/-\phi)_s$, 역대칭 $(\phi/-\phi)_2$이고, 곡절각도 α, β는 동일하게 90^o에서 180^o까지 30^o씩 증가시키면서 매개변수를 설정하였다.

Table 4와 Fig. 8은 곡절각도와 보강각도에 따른 좌굴하중의 분포를 나타낸 것이다. 역대칭 배열시 곡절각도 150^o까지는 보강각도 15>30>0의 순서로 좌굴하중이 크게 발생하였지만, 곡절각도 160^o이상에서는 보강각도 0>15>30의 순서로 평판처럼 보강각도가 커질수록 좌굴하중이 감소한다. 보강각도 45^o이상일 때 곡절각도 120^o에서 안정성이 크게 확보되며, 대칭배열보다는 역대칭 배열에서 거동차이가 보다 확연히 드러나고 있다. 따라서, 채널단면을 갖는 복합재료 구조물의 곡절각도에 따라 화이버의 보강각도를 적절히 배열함으로써 구조적으로 좌굴에 안정적인 설계를 할 수 있을 것이다.

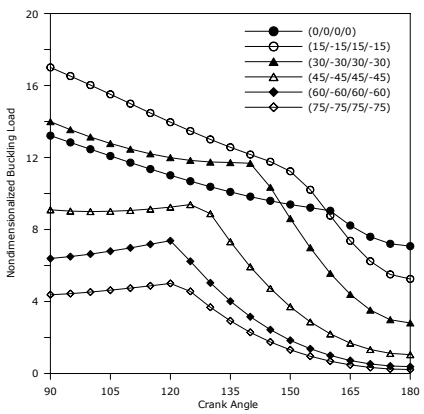


Fig. 8 역대칭 배열시 곡절각도와 보강각도에 따른 무차원 좌굴하중

Table 4 곡절각도와 보강각도에 따른 무차원 좌굴하중

적층조건	곡절각도 α, β	보강각도 ϕ					
		0	15	30	45	60	75
$(\phi/-\phi)_S$	90	13.2135	17.0041	13.9877	9.0941	6.3870	4.3734
	120	11.0088	13.9607	11.9898	9.2420	7.3746	5.0030
	150	9.3868	11.2329	8.6076	3.7079	1.8416	1.3130
	160	9.0409	8.7680	5.5625	2.1982	0.9985	0.6843
	180	7.0715	5.2515	2.8048	1.0424	0.3754	0.2199
$(\phi/-\phi)_2$	90	13.2135	11.9832	11.4647	8.1851	5.7444	3.8651
	120	11.0088	10.4999	9.7274	7.8547	6.2316	4.0834
	150	9.3868	8.0271	6.9193	3.5707	1.8396	1.3134
	160	9.0408	6.7996	4.8052	2.0868	0.9879	0.6848
	180	7.0715	4.6542	2.4221	0.9219	0.3534	0.2186

4. 결 론

본 연구에서는 절점당 8개의 자유도를 갖는 평판/쉘 유한요소를 사용하였으며 채널단면을 갖는 캔틸레버 복합재료 구조물의 좌굴거동특성을 분석하였다. 이때 가정된 변형률장을 적용하여 유한요소에서 발생할 수 있는 잠김현상과 가상의 제로에너지모드를 제거함으로써 거동을 개선하였다. 개선된 고차전단변형 유한요소에 의해 기하학적인 형상 및 화이버 보강각도의 변화에 따른 채널단면을 갖는 복합재료 구조물의 좌굴하중을 비교·분석하였다.

채널단면의 길이변화에 따른 좌굴하중의 분포경향은 y_2의 길이가 y_1의 길이의 2배가 될 때, 중심축을 기준으로 채널단면이 비대칭보다 대칭으로 구성될 때 보다 안정적임을 알 수 있었다. 대칭배열보다는 역대칭 배열을 갖는 경우 곡절각도에 따른 화이버 보강각도의 변화에 의한 좌굴하중이 가장 민감하게 반응하였다. 즉, 평판 구조물과는 달리 채널단면을 갖는 복합재료 구조물은 단면의 곡절된 기하학적 형상 및 보강각도에 의한 상호작용으로 좌굴하중이 평판과는 다르게 발생함을 알 수 있었다. 따라서, 절판 구조물의 곡절각도에 따라 보강각도를 적절히 배열함으로써 구조적으로 좌굴에 안정적인 설계를 할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 천경식, 손병직, 장석윤, “면내하중을 받는 브라켓의 탄성좌굴거동에 관한 보강효과 연구”, 대한토목학회 논문집, 제23권, 제1-A호, 2003, pp.57-64.
2. 천경식, 최회권, 장석윤, “다양한 Serendipity 유한요소에 따른 복합적층판의 정적, 좌굴 및 자유진동해석 비교연구”, 대한토목학회 논문집, 제23권, 제5-A호, 2003, pp.901-909.
3. 천경식, 김종수, 장석윤, “복합적층 절판 지붕구조물의 자유진동 및 모드특성”, 대한토목학회 논문집, 제23권, 제5-A호, 2003, pp.1019-1028.
4. 이성우, 이선구, 김정현, “경량 고내구성 복합소재 교량 바닥판의 개발”, 대한토목학회 학술발표논문집, 2001, pp.1-4.
5. 지효선, 손병직, 천경식, 장석윤, “완전 복합신소재교량 상부구조 현장적용 실험연구”, 대한토목학회 학술발표논문집, 2002, pp.139-142.
6. 한국건설기술연구원, “복합재료 바닥판 연구 세미나”, 2003.
7. Shi, G., Lam, K.Y., Tay, T.E. and Reddy, J.N., “Assumed strain quadliateral C^0 laminated plate element based on third-order shear deformation theory”, Structural Engineering and Mechanics, Vol.8(6), 1999, pp.623-637.
8. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L., The Finite Element Method, Vol.2, 4th edn, McGraw-Hill, 1991.

(접수일자 : 2003년 11월 24일)