

† . \* . \*\* . \*\*\*

## Bending and Torsional Behaviors of Thick Composite Channel Beam

Mi-Jung Park, Yong-Jin Choi, Heung-Jae Chun and Joon-Hyung Byun

**Key Words :** Composite Material(복합재료), Channel Beam(채널빔), Bending Behavior(굽힘거동), Torsional Behavior(비틀림거동), Warping Function(뒤틀림함수),

### Abstract

The applications of composite materials have increased over the past few decades in a variety of structures that require high ratio of stiffness and strength to weight ratios. Recently the thick open section composite beams are used extensively as load carrying members and stiffeners of structural elements. However, most of studies on thick composite beams are limited only to closed section beams. In this study, an open cross-section thick-walled composite beam model which includes coupled stiffness, transverse shear, and warping effects is suggested and the deflections associated with the thick-walled composite beams and thin-walled composite beams are obtained and compared with the finite element analysis results.

$F(x)$ : 축 방향에 대한 인장력  
 $V_y(x)$ : y 방향의 전단력  
 $V_z(x)$ : z 방향의 전단력  
 $T_s(x)$ : St. Venant 토오크  
 $M_y(x)$ : 수직방향 굽힘 모멘트  
 $M_z(x)$ : 수평방향 굽힘 모멘트  
 $M_w(x)$ : Vlasov 뒤틀림 모멘트  
 $u_0'(x)$ : 축 방향 변형  
 $\Phi_y'(x)$ : 수직방향의 변화율  
 $\Phi_z'(x)$ : 수평방향의 변화율  
 $\Theta'(x)$ : 비틀림 변형의 변화율  
 $\Theta''(x)$ : 전단중심을 고려한 뒤틀림 변화율  
 $C_{ij}$ : 두꺼운 복합재료 개단면 빔의 변환된 강성행렬 요소

$K_{ij}$ : 힘과 모멘트에 따르는 변위 관계식을 구성하는 강성행렬

$\overline{Q}_{ij}$ : 축소된 변형강성

$$\delta = \sqrt{K_{77} / K_{44}}$$

$$\overline{K}_{44} = K_{44} - \frac{K_{45}^2}{K_{55}}$$

### 1.

항공, 우주 분야 및 스포츠 분야까지 사용되어지고 있는 복합재료 중 섬유강화 복합재료는 적층판의 두께와 섬유의 각도 그리고 적층 순서를 결정할 수 있는 특성을 갖고 있으므로 설계자의 요구조건에 적합한 특성을 갖도록 구조요소를 설계할 수 있으며, 철재 구조물과 같은 강도를 유지하면서도 그 무게를 현저하게 감소시킬 수 있으며, 일체식 제작이 가능하여 유지 및 보수가 용이하고, 피로파괴 및 손상에 강하며 적층각 및 적층순서 등을 적절하게 조절하여 원하는 역학적 성질을 갖도록 하는 테일러링이 자유로운 장점을 가지고 있다.<sup>1)</sup> 그러나 두꺼운 개단면 복합재료 빔의 거동

† 연세대 대학원 기계공학과  
 E-mail : shinkansen@yonsei.ac.kr  
 TEL : (02)2123-4827 FAX : (02)362-2736

\* 연세대 대학원 기계공학과

\*\* 연세대학교 기계공학부

\*\*\* 한국기계연구원

에 관한 이론의 정립이 미비한 실정이며, 1 차 구조재로서 복합재료 빔을 구조물에 적용하기 위해서는 두꺼운 개단면 복합재료 빔 이론 모델의 개발이 시급한 실정이다.

Vlasov 와 Gjelsvik 의 이론에 의하여 관형 박벽 요소의 2 차원 문제를 1 차원 문제로 단순화 시키므로, 변위장은 기하학적 조건으로써 빔의 변위장으로, 박벽 요소의 응력은 빔의 합력으로 변환함으로써 얇은 개단면 및 폐단면 등방성 빔의 거동에 대한 선형 해석이론이 정립되었다.<sup>2)</sup> 그리고, Vlasov 의 이론을 확장한 Bauld 와 Tzeng 의 이론은 Vlasov 형 등방성 박벽 빔 이론에서 적용한 단면형상(Contour)방향 변형율과 전단 변형율에 대한 가정과 박벽요소에 대한 Kirchhoff 가설을 그대로 적용하고 있으며, 이방성 복합재료 박벽 요소에는 고전 적층 이론의 상관관계식이 성립하며 모든 박벽 요소는 요소의 중립면에 대해 대칭으로 적층 되었다는 추가적인 가정을 도입, 복합재료로 적층된 박판의 기하학적 조합으로 이루어진 이방성 박벽 빔에 대한 선형 해석 이론을 제안하였다.<sup>3)</sup> 3 차원 효과를 고려한 뒤틀림 효과를 적용하여 폐단면 두꺼운 복합재료 상자형 빔에 대한 해석 모델은 White 와 Kim 이 제시하였다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 대칭 적층시의 연성에 대한 두꺼운 개단면 복합재료 빔에 대하여 집중 하중과 비틀림 하중을 각각 적용하였을 때의 각각의 굽힘변위를 포함하여 얇은 개단면 복합재료 빔의 해석결과와 비교하여 얇은 복합재료 빔 이론과 두꺼운 복합재료 빔의 차이를 유한요소와 비교, 고찰하였으며, 또한 두꺼운 개단면 복합재료 빔의 두께방향의 뒤틀림을 고려하여 빔의 두께변화 및 높이, 폭의 변화에 따른 빔의 거동을 고찰하였다.

## 2.

### 2.1 가

두꺼운 복합재료 보 이론을 적용을 위해서는 다음과 같은 기본가정을 사용하게 된다.

- (1) 두꺼운 복합재료 보의 단면의 등고선은 자신의 면에 대하여 변형하지 않는다.
- (2) 굽힘과 전단에 따르는 보 단면의 면의 변위는 단면의 좌표계인  $y$  혹은  $z$  의 3 차함수로 나타내어진다.
- (3) 두꺼운 복합재료 보의 각 벽요소는 두꺼운

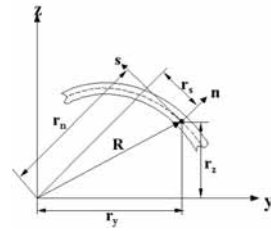


Fig. 1 Cartesian and curvilinear coordinate systems

셀의 거동을 나타낸다.

- (4) 주 뒤틀림과 변의 비틀림 효과는 보에 대하여 유효하다.
- (5) 미소 변형 및 선형탄성 한계 내에서 빔은 거동한다.

### 2.2

이론적 해석 모델의 전개를 위해서 Fig.1 에서 보는 바와 같이 두가지 종류의 좌표계를 적용할수 있으며, 적용된 좌표들은 상호 연관되어 있다.

첫째로, 보의 길이 방향을  $x$  축으로 설정하고, 단면이  $y$  와  $z$  축으로 구성되어 지는 직교 좌표계 (Cartesian coordinate) ( $x, y, z$ )이다.

두 번째로, 보의 플랜지나 웹요소를 구성하는 평판의 국부좌표계 (Local coordinate) ( $x, s, n$ )이다. Fig.1 에서 보는 바와 같이  $s$  는 단면 등고선의 접선 방향을 나타내고,  $n$  은 단면 등고선의 직각방향을 나타내며,  $x$  축은 보의 직교 좌표계인  $x$  축과 일치한다.

### 2.3

두꺼운 복합재료 개단면 보의 경우 이방성 특성을 가지게 되고, 직교 이방성을 갖는 일반적인 복합재료의  $k$  번째 적층판은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{ss} \\ \sigma_{nn} \\ \tau_{sn} \\ \tau_{nx} \\ \alpha_{xs} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{13} & 0 & 0 & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{23} & 0 & 0 & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{13} & \overline{Q}_{23} & \overline{Q}_{33} & 0 & 0 & \overline{Q}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \overline{Q}_{44} & \overline{Q}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{Q}_{45} & \overline{Q}_{55} & 0 \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{36} & 0 & 0 & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{ss} \\ \epsilon_{nn} \\ \gamma_{sn} \\ \gamma_{nx} \\ \gamma_{xs} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

또한 응력성분  $\sigma_{nn}, \sigma_{ss}, \tau_{sn}$  은 면외 응력성분으로서 다른 응력성분들에 비하여 무시할 만큼 작은 값을 가진다. 그러나 면외응력 성분에서 따르는 변형율 성분인  $\epsilon_{nn}, \epsilon_{ss}, \gamma_{sn}$  은 보의 두께가 증가함에 따라 무시할 수 없는 항이 된다. 따라서  $\epsilon_{nn}, \epsilon_{ss}, \gamma_{sn}$  항을 고려하여  $\epsilon_{xx}, \gamma_{xs}, \gamma_{xn}$  의 항으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{ss} = B_1 \epsilon_{xx} + B_2 \gamma_{xs} \tag{2}$$

$$\epsilon_{mm} = B_3 \epsilon_{xx} + B_4 \gamma_{xs} \tag{3}$$

$$\gamma_{sn} = B_5 \gamma_{xn} \tag{4}$$

여기서,  $B_1, B_2, B_3, B_4$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_1 = \frac{\overline{Q_{13} Q_{23}} - \overline{Q_{12} Q_{33}}}{\overline{Q_{22} Q_{33}} - \overline{Q_{23}^2}} \tag{5}$$

$$B_2 = \frac{\overline{Q_{23} Q_{36}} - \overline{Q_{26} Q_{33}}}{\overline{Q_{22} Q_{33}} - \overline{Q_{23}^2}} \tag{6}$$

$$B_3 = \frac{\overline{Q_{12} Q_{23}} - \overline{Q_{22} Q_{13}}}{\overline{Q_{22} Q_{33}} - \overline{Q_{23}^2}} \tag{7}$$

$$B_4 = \frac{\overline{Q_{26} Q_{23}} - \overline{Q_{22} Q_{36}}}{\overline{Q_{22} Q_{33}} - \overline{Q_{23}^2}} \tag{8}$$

$$B_5 = -\frac{\overline{Q_{45}}}{Q_{44}} \tag{9}$$

면의 응력성분을 제외하고, 앞에서 표현한 면의 변형을 성분을 적용하게 되면 다음과 같은  $k$  번째 적층에 대한 3 차원 탄성효과를 가지는 축소된 구성방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \tau_{xs} \\ \tau_{xm} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \gamma_{xs} \\ \gamma_{xm} \end{Bmatrix}_k \tag{10}$$

2.4 -

응력 변위 관계에 변형을 관계를, 직교 좌표계를 국부좌표계에 따라 변환하여 적분을 하게 되면 다음과 같은 두꺼운 복합재료 개단면 보의 힘-모멘트에 따르는 변위 관계식을 얻게 된다.

$$\begin{Bmatrix} F(x) \\ V_y(x) \\ V_z(x) \\ T_x(x) \\ M_y(x) \\ M_z(x) \\ M_w(x) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} & K_{17} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} & K_{27} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} & K_{37} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} & K_{47} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} & K_{57} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} & K_{67} \\ K_{71} & K_{72} & K_{73} & K_{74} & K_{75} & K_{76} & K_{77} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0'(x) \\ v_0'(x) - \phi_y(x) \\ w_0'(x) - \phi_z(x) \\ \theta'(x) \\ \phi_y'(x) \\ \phi_z'(x) \\ \theta''(x) \end{Bmatrix} \tag{11}$$

성효과들이 발생하며, 탄성적으로 연계되어지는 항이 빔의 끝단에 휨모멘트 혹은 비틀림 모멘트를 작용하였을 경우 휨-비틀림 연계강성이 존재하여 힘-변위 관계식에 따르는 강성행렬 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F(x) \\ V_y(x) \\ V_z(x) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{12} & K_{22} & 0 \\ K_{13} & 0 & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0'(x) \\ v_0'(x) - \phi_y(x) \\ w_0'(x) - \phi_z(x) \end{Bmatrix} \tag{12}$$

$$\begin{Bmatrix} T_x(x) \\ M_u(x) \\ M_w(x) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{44} & K_{45} & 0 \\ K_{45} & K_{55} & 0 \\ 0 & 0 & K_{77} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta'(x) \\ \phi_y'(x) \\ \theta''(x) \end{Bmatrix}$$

식 (12)로부터 전체 비틀림에 관계된 식을 나타낼 수 있다.

$$\bar{T} = K_{44} \theta'(x) + K_{45} \phi_z'(x) - K_{77} \theta''(x) \tag{13}$$

빔의  $\phi_z'(x)$  성분은 (13)에서 (14)와 같이 나타낼 수 있고, (14)에 대입하여 정리하면 전체 비틀림 하중에 대한 비틀림 변위에 대한 식을 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_z'(x) = -\frac{K_{45}}{K_{55}} \theta'(x) \tag{14}$$

$$\bar{T} = K_{44} \theta'(x) - \frac{K_{45}^2}{K_{55}} \theta'(x) - K_{77} \theta''(x) \tag{15}$$

비틀림 하중에 대한 비틀림 변위식 (15)는 비틀림 변위에 대하여 (16)과 같이 나타낼 수 있으며, 비틀림 하중에 따른 수직방향 굽힘 기울기에 대한 식은 (16)을 (14)에 대입하여 얻는다.

$$\theta(x) = \frac{\delta \bar{T}}{K_{44}} \left[ \frac{x}{\delta} - \sinh\left(\frac{x}{\delta}\right) + \frac{\cosh((l/\delta) - 1) \cosh\left(\frac{x}{\delta} - 1\right)}{\sinh(l/\delta)} \right] \tag{16}$$

$$w_0'(x) = \frac{K_{45}}{K_{55}} \frac{\delta \bar{T}}{K_{44}} \left[ \frac{x}{\delta} - \sinh\left(\frac{x}{\delta}\right) + \frac{\cosh((l/\delta) - 1) \cosh\left(\frac{x}{\delta} - 1\right)}{\sinh(l/\delta)} \right] \tag{17}$$

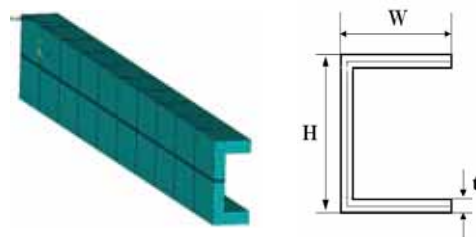


Fig. 2 Geometry of channel section beam

**Table 1** Mechanical properties of composite material

Parameter	Value
E <sub>11</sub> (Longitudinal Modulus)	43GPa
E <sub>22</sub> (Transverse Modulus)	8.9GPa
G <sub>12</sub> (In-Plane Shear Modulus)	4.5GPa
ν <sub>12</sub> (Poisson's Ratio)	0.27

끝단에 전단하중 P 가 작용하는 경우 (12)로부터 회전각 성분은 (18)과 같으며 굽힘 하중에 따르는 비틀림 변형에 대한 해석은 (19)와 같으며, 굽힘 변형에 대한 식은 (20)과 같다.

$$\phi'_z(x) = -\frac{K_{45}}{K_{55}} \theta'(x) - \frac{P(l-x)}{K_{55}} \quad (18)$$

$$\theta(x) = \frac{Pl\delta}{K_{44} K_{55}} \left[ \frac{lx - x^2/2}{\delta} + \coth\left(\frac{x}{\delta}\right) \cdot \cosh(l/\delta - 1) - \sinh\left(\frac{x}{\delta}\right) \right] \quad (19)$$

$$w'_0(x) = \frac{K_{11}K_{11} - K_{13}^2}{\Delta_{ES}} \frac{P(lx - x^2/2)}{K_{33}} + \frac{K_{45}}{K_{55}} \theta(x) \quad (20)$$

3.

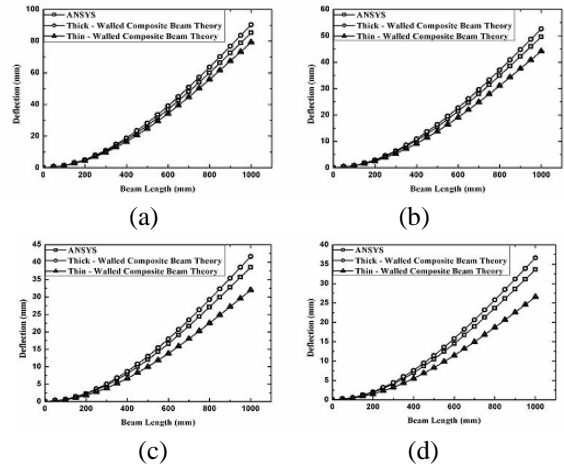
복합재료 채널빔을 힘과 모멘트에 따르는 변위 관계식을 이용한 해석한 결과와 비교하기 위하여 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS 의 해석 결과와 비교하였다. Fig.2 에 두꺼운 복합재료 채널빔의 단면 형상과 유한요소 모델이며, 8 절점 3 차원 적층 구조 요소인 Solid46 요소를 사용하였다.

두꺼운 복합재료 채널빔의 거동에 관한 해석을 수행하기 위하여 복합재료는 Glass-Epoxy 를 사용하였으며, 사용된 복합재료의 물성치는 Table.1 과 같다. 또한, 해석모델을 플랜지의 폭(W)과 웹의 높이(H)를 변화시키면서 두가지 단면 형상의 모델에 적용하였고, 굽힘 하중은 단면에서 전단중심에 1kN 의 힘을, 비틀림 하중은 빔의 양 끝단에 1kN·mm 을 각각 적용하였다. 그리고, 단면을 구성하는 요소는 중립면에 대하여 대칭 적층된 앵글플라이이다.

4.

4.1

굽힘 하중을 작용하였을 때, 얇은 복합재료 두

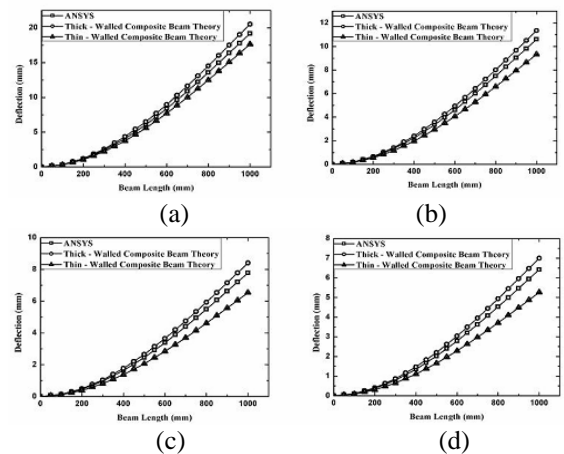


**Fig. 3** Deflection of the composite beams with different wall thickness(H:60mm, W:30mm) as functions of thicknesses : (a)3mm,(b)6mm,(c)9mm,(d)12mm

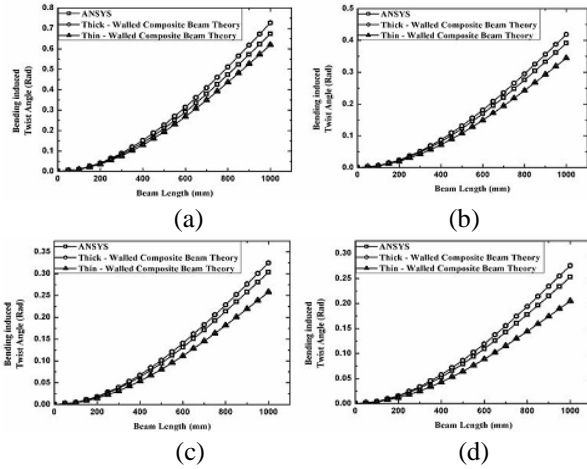
꺼운 빔 이론과 두꺼운 복합재료 빔 이론, 유한요소 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다.

동방성 재료로 구성 되어지는 빔 구조물은 재료의 특성상 굽힘 하중을 작용하였을 때 탄성 구조적인 연성향이 발생하지 않으나, 복합재료로 구성 되어 지는 빔 구조물은 재료의 이방성 특성을 나타내게 되므로 탄성 구조적인 연성향이 발생하게 된다. 해석하는 모델은 복합재료 빔 구조물의 경우 상부 플랜지와 하부 플랜지가 y 축을 기준으로 동일 적층된 대칭 적층을 적용하였으므로, 굽힘-비틀림 연성향의 거동을 나타내게 된다. 따라서, 굽힘 하중을 작용하였을 경우 굽힘에 따르는 비틀림각을 결정할 수 있다.

Fig. 3 과 Fig.5 의 결과는 높이 60mm, 폭 30mm 의 형상에서의 결과이다. 두께 3mm 에서는 두꺼



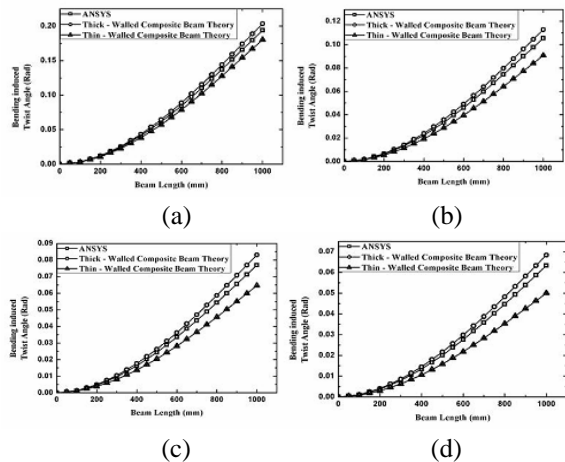
**Fig. 4** Deflection of the composite beams with different wall thickness(H:90mm, W:60mm) as functions of thicknesses : (a)3mm,(b)6mm,(c)9mm,(d)12mm



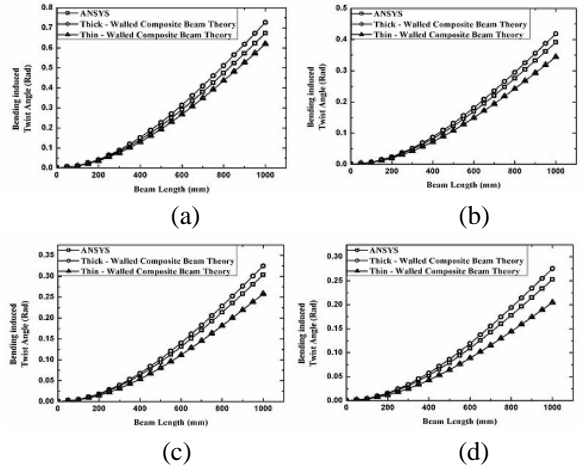
**Fig. 5** Bending induced twist angles of the composite beams with different wall thickness(H:60mm, W:30mm) as functions of thicknesses : (a)3mm,(b)6mm,(c)9mm,(d)12mm

은 복합재료와 얇은 복합재료 빔 이론에 의한 굽힘 거동의 결과가 유한요소해석에 의한 결과와 모두 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나, 두께 6mm, 9mm, 12mm 에서는 두꺼운 복합재료 빔 이론에 의한 결과는 유한요소해석에 의한 결과와 잘 일치함을 알 수 있으나, 얇은 복합재료 빔 이론에 의한 결과의 경우 두꺼운 복합재료 빔 이론에 의한 결과에 의하여 상대적으로 큰 오차를 가지는 것을 알 수 있다.

Fig.4 와 Fig.6 은 높이와 폭을 변화시켜 해석한 결과이다. 그래프 끝단에서 유한요소해석에 의한 결과와 얇은 복합재료 빔 이론, 두꺼운 복합재료 빔 이론의 결과의 오차는 앞에서 보여지는 결과와  $\pm 1\%$  의 오차를 보인다.



**Fig. 6** Bending induced twist angles of the composite beams with different wall thickness(H:90mm, W:60mm) as functions of thicknesses : (a)3mm,(b)6mm,(c)9mm,(d)12mm

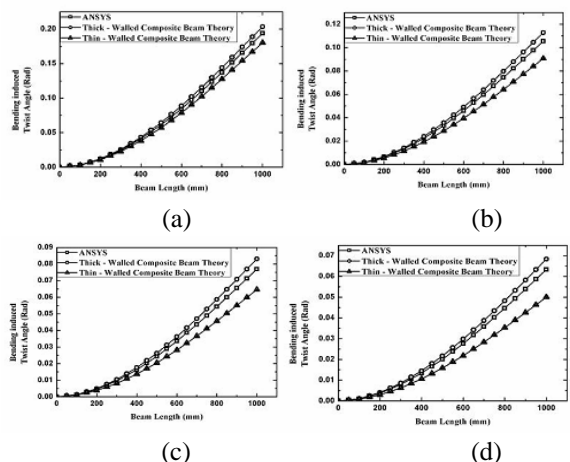


**Fig. 7** Bending induced twist angles of the composite beams with different wall thickness(H:60mm, W:30mm) as functions of thicknesses : (a)3mm,(b)6mm,(c)9mm,(d)12mm

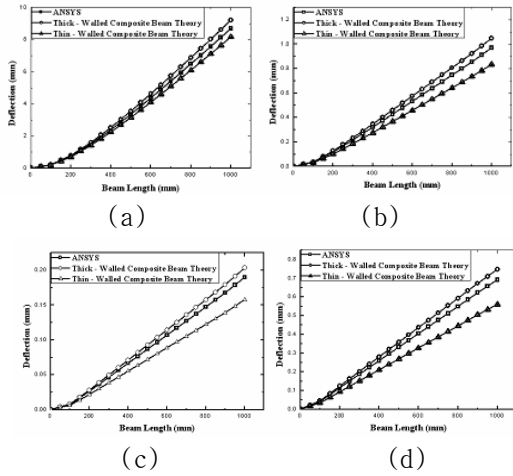
4.2

비틀림 하중을 작용하였을 때, 얇은 복합재료 두꺼운 빔 이론과 두꺼운 복합재료 빔 이론, 유한요소해석결과를 비교하여 나타낸 것이다.

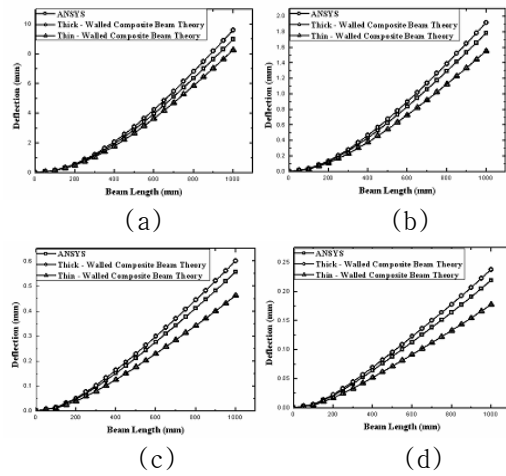
Fig. 7 과 Fig.9 의 결과는 높이 60mm, 폭 30mm 의 형상에서의 결과이다. 두께 3mm 에서는 두꺼운 복합재료와 얇은 복합재료 빔 이론에 의한 굽힘 거동의 결과가 유한요소해석에 의한 결과와 모두 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나, 두께 6mm, 9mm, 12mm 에서는 두꺼운 복합재료 빔 이론에 의한 결과는 유한요소해석에 의한 결과와 잘 일치함을 알 수 있으나, 얇은 복합재료 빔 이론에 의한 결과의 경우 두꺼운 복합재료 빔 이론에 의한 결과에 의하여 상대적으로 큰 오차를 가지는 것을 알 수 있다.



**Fig. 8** Bending induced twist angles of the composite beams with different wall thickness(H:60mm, W:30mm) as functions of thicknesses : (a)3mm,(b)6mm,(c)9mm,(d)12mm



**Fig. 9** Transverse deflection of the composite beams with different wall thickness(H:60mm, W:30mm) as functions of thicknesses : (a)3mm,(b)6mm,(c)9mm,(d)12mm



**Fig. 10** Transverse deflection of the composite beams with different wall thickness(H:90mm, W:60mm) as functions of thicknesses : (a)3mm,(b)6mm,(c)9mm,(d)12mm

Fig.8 와 Fig.10 은 높이와 폭을 변화시켜 해석한 결과이다. 그래프 끝단에서 유한요소해석에 의한 결과와 얇은 복합재료 빔 이론, 두꺼운 복합재료 빔 이론의 결과의 오차는 앞에서 보여지는 결과와 ±1%의 오차를 보인다.

있기 때문에 예상된다. 따라서, 두께가 두꺼운 복합재료 빔을 구조물에 사용할 경우 두꺼운 복합재료 빔 이론을 적용하게 되면 더욱 정확한 값을 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

5.

본 연구에서는 [0/45/90/-45]<sub>sn</sub>의 적층 순서를 가지는 복합재료 보에 대하여 높이와 폭에 따른 변화에 대하여 복합재료 채널빔을 단면형상으로 설정하고, 이에 대하여 두께를 증가시키면서 두꺼운 복합재료 빔 이론과 얇은 복합재료 빔 이론을 적용하여 굽힘 하중에 대한 빔의 굽힘 거동과 비틀림 하중에 대한 비틀림 거동에 관하여 예측을 유한요소해석에 의한 결과와 비교하였다.

두께가 3mm 일 때, 유한요소해석에 의한 결과와 얇은 복합재료 빔 이론, 두꺼운 복합재료 빔 이론에 의한 결과의 오차가 거의 없었으나, 두께가 6mm, 9mm, 12mm 로 점점 증가하면서 얇은 복합재료 빔 이론에 의한 결과와 유한요소해석 결과값의 오차가 커지는 것을 알 수 있었다. 반면, 두꺼운 복합재료 빔 이론의 결과와 유한요소해석 결과를 비교하여 보면, 두께가 3mm, 6mm, 9mm, 12mm 로 증가하여도 오차가 10% 내로 거의 없음을 알 수 있었다. 또한 넓이와 폭을 달리 하여 결과를 살펴보다라도 같은 결과를 얻게 된다. 이는 얇은 복합재료 보 이론에서는 고려하지 않는 면의 응력에 대한 변형율과 고차항으로 이루어지는 전단효과를 두꺼운 복합재료 보 이론의 경우 고려하고

본 연구는 차세대 프론티어 사업 차세대 소재 성형 기술 개발사업의 연구비 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

- (1) I. M. Daniel, Ori Ishai, 1994. "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press.
- (2) V. Z. Vlasov. , 1961 "Thin-Walled Plastic Beams", Naional Science Foundation and U.S. Dept. of Commerce, Washington, DC.
- (3) N. R. Bauld., Tzeng. , 1984, "A Vlasov Theory for Fiber Reinforced Beams with Thin Walled Open Cross Sections", Int. J. Solid struct., 20, pp. 227-297.
- (3) R. Chandra, I. Chopra. , 1992 "Structural Behavior of Two-cell Composite Rotor Blades with Elastic Couplings", AIAA Journal, 30, pp.2914-2921.
- (4) X. X. Wu, C. T. Sun. , 1992 "Simplified theoryfor Composite Thin-Walled Beams", AIAA Journal, 30, pp.2945-2951.
- (5) C. Kim, S. R. White. , 1997, "Thick-Walled Composite Beam Theory Including 3-D Elastic Effects and Torsional Warping", Int. J. Solid struct, 34, pp.4237-4259.