

# 냉각탑용 복합재 커플링의 비틀림 특성

## Torsional Property of Cooling Tower Composite Couplings

김병하\*† · 김태용\* · 윤정인\*\*  
Byung-Ha Kim\*† , Tae-Yong Kim\* and Jung-In Yoon\*\*

(Received 06 September 2023, Revision received 24 October 2023, Accepted 25 October 2023)

**초록 :** 냉각탑에 적용 가능한 탄소섬유/에폭시 복합재 튜브를 필라멘트 와인딩 공정에 의해 제조하였다. 냉각탑의 동력 전달장치에 사용되는 커플링에서 정적 및 동적인 기계적 거동을 결정하는 가장 중요한 성능 지수는 비틀림 강성이다. 이 논문에서는 후프 와인딩을 포함하는 적층 순서인  $[\pm\theta/90/\pm\theta/\pm\theta/90]$ 의 복합재 튜브에서 와인딩 각도( $\theta$ ), 튜브 직경 및 튜브 길이에 따른 비틀림 강성을 토크 시험기를 사용하여 측정하였으며, 이러한 변화에 대한 비틀림 특성의 영향을 확인하였다. 구조해석을 통하여 복합재 튜브의 비틀림 특성을 예측하였고, 비틀림 모멘트-각도 변화를 예측한 결과, 시험치와 잘 일치하였다. 다양한 와인딩 각도( $\theta=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ )의 복합재 튜브에 대한 비틀림 강도해석 결과,  $45^\circ$ 일 때 비틀림 모멘트가 최댓값을 보이고 비틀림 각도가 가장 낮기 때문에 동력을 전달하기 위한 복합재 커플링 제작에 가장 적합함을 알 수 있었다.

**키워드 :** 복합재 커플링, 필라멘트 와인딩, 섬유적층 각도, 비틀림 특성, 파손지수

**Abstract :** In order to replace a metal coupling used for cooling towers, a light-weight coupling of carbon/epoxy composites was manufactured by filament winding process. One of the most important parameters determining the static and dynamic mechanical behaviour of a coupling under torsional loading is the torsional stiffness. In this study, torsional characteristics of the composites tube such as torsional stiffness, strength and maximum twist angle were identified for  $[\pm\theta/90/\pm\theta/\pm\theta/90]$  stacking sequence with the variation of winding angle ( $\theta$ ), and the tube diameter and length. The structural analysis was carried out to compare the predictions of torsional stiffness with that of the experimental results. From FEM analysis the optimal winding angle that gave the maximum torsional moment and minimum twisting angle of the composite tube was  $45^\circ$ .

**Key Words :** Composites Coupling, Filament Winding, Stacking Sequence, Torsional Property, Failure Index

### 1. 서 론

냉동공조 시스템의 냉각탑에 사용되는 구조물

인 장축 커플링(coupling)은 냉각탑의 외부에 설치된 구동모터에서 동력을 전달받아 송풍팬을 구동하는 역할을 한다.<sup>1)</sup> 기존에 사용되고 있는 금속재

\*† 김병하(<http://orcid.org/0009-0005-2635-5349>) : 대표이사, KCA  
E-mail : tycompo@naver.com, Tel : 055-345-6027  
\*김태용(<http://orcid.org/0009-0009-2162-5919>) : 과장, KCA  
\*\*윤정인(<http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : 교수, 부경대학교 냉동공조공학과

\*† Byung-Ha Kim(<http://orcid.org/0009-0005-2635-5349>) : CEO, KCA.  
E-mail : tycompo@naver.com, Tel : 055-345-6027  
\*Tae-Yong Kim(<http://orcid.org/0009-0009-2162-5919>) : Researcher, KCA.  
\*\*Jung-In Yoon(<http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : Professor, Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering Bukyong National University.

커플링의 경우 무게로 인한 휨 현상이 발생하여 진동과 공진에 의한 소음이 발생할 뿐만 아니라 심한 경우 파손에 이를 수 있다. 또 냉각탑 내부의 포화습공기에 의한 부식 문제로 금속재는 내부식 재료인 스테인리스 재질을 주로 사용하고 있다. 이러한 금속재료가 가지는 문제는 복합소재로 대체함으로써 해결할 수 있는데, 기존 금속재 무게의 70% 수준의 경량화를 통하여 환경소음을 최소화하고 냉각탑 설치와 유지보수가 용이하며 피로 수명 연장이 가능하다.

복합재 튜브는 보통 필라멘트 와인딩 성형법을 이용하여 제조되는데, 이 방법은 생산성이 높고 설계 유연성과 제조 용이성이 뛰어나기 때문에 원통형 구조물뿐만 아니라 드라이브 샤프트, 압력 용기, 포스트, 풍력타워 구조물에 이르기까지 응용 범위가 매우 넓다.<sup>2-5)</sup>

동력 전달장치에 사용되는 원통형 튜브 복합재는 주로 비틀림 하중을 받게 되는데, 이때 재료의 기계적 거동은 섬유 종류 및 섬유가 배열되는 와인딩 각도와 적층 순서에 따라 큰 변화를 보인다. Badie<sup>6)</sup>는 유리섬유에 비하여 카본섬유를 사용할 때 복합재의 비틀림 강성이 증가하며 적층 각도 45°의 경우 최대가 됨을 보였다. Abu Talib<sup>7)</sup>의 수치해석 결과에서는 최적의 적층 각도는 가장 낮은 값을 보이는 적층 각도에 비해 46% 더 높은 강도 값을 보였다. Colombo<sup>8)</sup>의 수치해석에서는 최적의 섬유체적율과 적층각도는 각각 40~60%, ±44.5~±52.5°임을 보고하였다. Filho<sup>9)</sup>의 결과에 따르면 [±45/±45] 적층 순서가 비틀림 하중에서 가장 높은 성능을 보였다. Soykok<sup>10)</sup>은 프리프레그 랩핑(wrapping)과 필라멘트 와인딩 공정을 사용하여 유리섬유/에폭시 복합재 튜브에 대한 실험적 및 해석적 연구를 하였다. [±30], [±45], [±60]에 대한 실험치와 해석결과는 잘 일치하였다.

위에 살펴본 바와 같이 기존의 연구는 헬리컬 와인딩 각도로 적층할 때의 기계적 특성이 최대가 되는 각도에 대한 연구를 주로 수행하였다. 그러나 실제로 필라멘트 와인딩을 하는 경우, 헬리컬 와인딩뿐만 아니라 90° 각도의 후프 와인딩도 함께 수행한다. 그 이유는 내압이 작용하는 경우

후프 와인딩이 가장 기계적 특성이 우수하여 다양한 하중을 견디는 데 유리하며, 이 각도에서 와인딩할 때 섬유에 작용하는 장력이 가장 크기 때문에 함침 수지를 압착하여 복합재의 섬유체적율을 높이는 데 효과적이기 때문이다. 따라서 이 논문에서는 후프 와인딩을 포함하는 적층 순서 [±θ/90/±θ/±θ/90]를 가지는 복합재 튜브에서 와인딩 각도 (θ)에 따른 비틀림 특성(비틀림 강성, 강도 및 최대 비틀림 각도)에 대한 연구를 하였다. 와인딩 각도, 튜브의 직경과 길이의 변화에 대한 비틀림 특성의 영향을 확인하였으며, 다양한 와인딩 각도의 복합재 튜브에 대한 구조해석을 통하여 최대의 비틀림 강도를 얻을 수 있는 최적의 와인딩 각도를 구하였다.

## 2. 복합재 튜브 제작

냉각탑의 복합재 튜브에 적용하는 각도는 헬리컬 와인딩과 후프 와인딩을 혼합한 [±θ/90/±θ/±θ/90]를 적용하여 필라멘트 와인딩 공정으로 제조하였다. 사용한 탄소 섬유는 TORAY 사의 T700SC -24000-50C이며, 수지는 국도화학의 에폭시를 사용하였다. Table 1은 제작된 복합재 튜브의 사양이다.

Table 1 Dimension of filament wound composites tube

Winding Angle (θ)	Inner Diameter (D), mm	Thickness (t), mm	Length (L), mm
15°	64	3.1	1,720 1,910 2,230 2,500
	100	3.0	3,450
45°	64	3.1	1,040
	80	3.2	1,074
	100	3.0	3,450

### 3. 커플링 비틀림 시험

복합재 튜브에 대한 비틀림 시험의 목적은 최대 비틀림 강도와 각도를 구하기 위한 것이다. 그러나 이 연구에서는 제조한 복합재 커플링이 냉각탑에 사용될 때의 요구 성능의 만족 여부를 확인하기 위한 시험을 하였다. 요구 성능 조건은 파손에 이르는 최대 비틀림 강도가 아니라 복합재 커플링에 최대 전달 토크를 일정한 시간 동안 가할 때 커플링을 구성하는 재료에 파손이 발생하지 않아야 한다는 조건이다. Fig. 1은 커플링을 구성하는 재료를 보인 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 플랜지는 튜브와 결합되어 스페이스를 구성하며 디스크팩을 통해 허브로 연결된다. 허브는 구동기와 피동기를 연결하는 장치 부품이다.

Fig. 2(a)는 이 연구에서 사용한 비틀림 시험 장비를 보여 주고 있다. 이 장비는 복합재 커플링이 냉각탑에 사용될 때의 요구 성능의 만족 여부를 확인하기 위한 것으로 복합재 튜브의 다양한 직경과 길이에 대하여 시험할 수 있도록 제작된 것이다. 시편의 한쪽 끝은 볼트 체결로 완전히 고정하고, 다른 쪽 끝은 비틀림 모멘트를 가하면서 비틀림 각도를 측정한다. Fig. 2(b) 및 (c)는 튜브 시편 고정부 및 하중인가부에 플랜지가 볼트로 체결되어 있는 모습을 보여 주고 있다. 튜브 시편에 가해지는 비틀림 모멘트 크기와 비틀림 회전 속도를 입력하고 각도 변화를 측정하였다. Fig. 2(d)는 가해진 모멘트와 회전 속도 및 각도 변화를 그래프로 보여 주고 있다. 비틀림 회전 속도는 rpm 값으로 하였고, 튜브의 길이와 직경에 따라 20~200 rpm을 일정하게 가하였다. 이 화면은 비틀

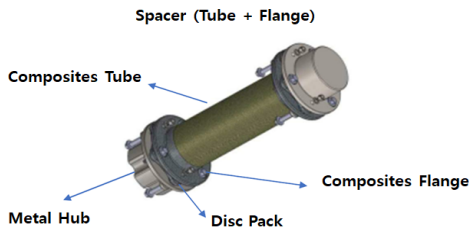
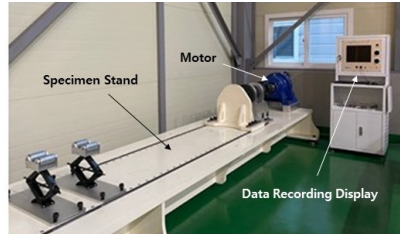
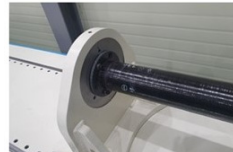


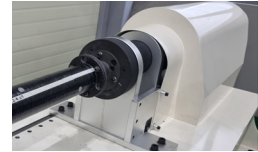
Fig. 1 Schematic of a coupling<sup>1)</sup>



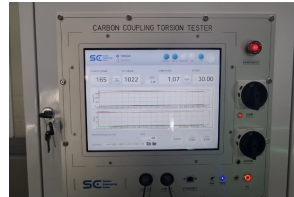
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2 (a) Torsional test machine; (b) mounting of the specimen at fixed end; (c) mounting of the specimen at loading end; (d) data recording display

림 모멘트 5,000 N에서 10분 동안 유지하고 있는 것을 보여 주고 있으며, 이 시간 동안 커플링을 구성하는 재료에서 파손이 발생하면 비틀림 하중은 감소되며 이 곡선의 추이로부터 재료 파손 여부를 확인할 수 있다.

Fig. 3은 복합재 튜브의 내경(64 mm)과 와인딩 각도 ( $\theta=15^\circ$ )가 일정하고 서로 다른 길이를 가지는 복합재 커플링의 비틀림 시험 결과로서 비틀림 모멘트-각도 그래프를 보여 주고 있다. 이 그래프의 기울기는 비틀림 모멘트를 각도로 나눈 값으로서 비틀림 강성( $k_T$ , Torsional Stiffness)이라고 하고 식 (1)로 표시된다.

$$k_T = \frac{T}{\phi} = \frac{G_{r\theta} I_p}{L} \quad (1)$$

여기서,  $T$ 는 비틀림 모멘트(Nm)이며,  $\phi$ 는 비틀림 각도(radian),  $G_r$ ,  $I_p$ ,  $L$ 은 각각 면내전단 탄성계수, 관성극모멘트 및 튜브의 길이이다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 와인딩 각도와 튜브 직경이 일정할 때 길이가 길수록 비틀림 각도는 증가하고 비틀림 강성은 감소함을 보여 주고 있다. 이는 식 (1)에서 보는 바와 같이 길이가 길수록 비틀림 강성은 감소하고 그 결과, 비틀림 모멘트가 일정할 때 비틀림 각도는 증가함을 알 수 있다. Fig. 4는 튜브 직경과 길이가 일정할 때 와인딩 각도의 변화에 따른 복합재의 비틀림 특성을 보인 것이다. 와인딩 각도가 45°의 경우 15°의 경우보다 비틀림 강성은 증가하였는데, 그 이유는 섬유배열 각도 45°에 가까울수록 전단탄성계수가 증가하여 비틀림 강성이 증가하기 때문이다.

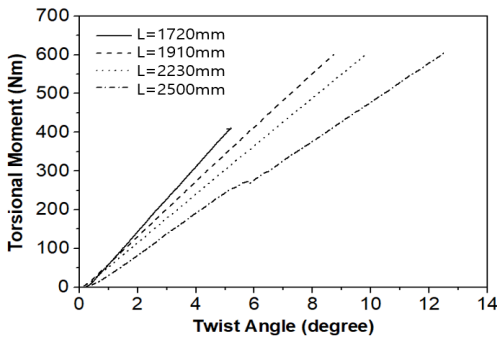


Fig. 3 Torsional moment—twist angle curves of 15° winding angle and diameter of 64mm specimen

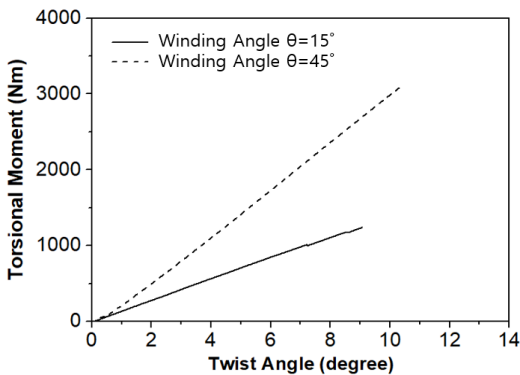


Fig. 4 Torsional moment—twist angle curves of 100 mm diameter and length of 3,450 mm

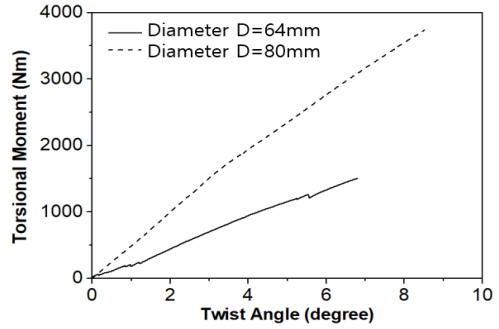


Fig. 5 Torsional moment—twist angle curves of 100 mm diameter and length of 3,450 mm

Fig. 5는 와인딩 각도와 길이가 일정할 때 튜브 직경 변화에 따른 복합재의 비틀림 특성을 보인 것이다. 직경이 클수록 비틀림 강성은 증가함을 알 수 있으며, 이는 식 (1)에서 알 수 있듯이 직경이 클수록 관성극모멘트 값이 증가하기 때문이다.

#### 4. 복합재 튜브 해석 모델링 및 실험결과 비교

냉각탑용 복합재 커플링의 요구조건을 확인하는 시험에서는 튜브의 파손은 일어나지 않기 때문에 이 연구에서는 복합재 튜브의 최대강도를 해석적으로 예측하고자 하였다. 튜브에 토크를 점진적으로 가해 파손에 도달하는지 여부를 판단하여 최대 강도를 구하였다. 먼저, 구조해석의 정확도를 확인하기 위해 커플링에 비틀림 하중이 작용할 때의 비틀림 강성 예측 결과와 시험결과를 비교하였다.

복합재 튜브 모델링은 ANSYS Workbench 2020 R2의 적층복합재료 모델링 툴인 ACP를 사용하였다. 재료 물성에 대한 입력값으로 일방향(UD, Uni-Directional) 복합재료에 대하여 Table 2에 정리한 물성치<sup>1)</sup>를 사용하였다.

Fig. 6(a)는 금속재 허브와 복합재료 플렌지가 결합된 커플링의 기하학적 모델링을 보인 것이며, Fig. 6(b)는 튜브 내부에 접착된 복합재 플렌지의 메쉬를 보인 것이다. Fig. 7은 경계조건을 나타낸 것으로, Fig. 7(a)는 고정 끝단의 금속재 허브에는

Table 2 Mechanical properties of UD composites<sup>1)</sup>

	Orientation	Elastic Modulus (GPa)	Strength (MPa)	Poisson Ratio
Tensile	0°	127	2474	0.31
	90°	6.8	29.6	
Compression	0°	101	593	
	90°	7.0	92.9	
In-plane Shear		4.47	63.0	

각 방향별 변위와 회전이 모두 고정되는 지지 조건을 부여한 것을 보여 주고 있다. 반대쪽 끝단의 금속재 허브에는 Fig. 7(b)에 보인 것처럼 원주 방향으로 비틀림 모멘트 조건을 부여하여 복합재료 튜브에 비틀림 하중을 가하였다.

복합재 튜브의 비틀림 특성을 예측하기 위해 와인딩 각도, 직경 및 길이가 각각 다른 튜브 2종에 대하여 구조해석을 하였다. Table 1에 정리한 바와 같이 모두 8가지 사양 중에서 각도 변화 두 조건, 직경 변화 두 조건, 길이 변화 두 조건 중에서 조합하였으며, 와인딩 각도, 직경 및 길이 조건이 중복되지 않도록 하였다. Fig. 8은( $\theta=45^\circ$ ,  $D=100$  mm,  $L=3,450$  mm)와 ( $\theta=15^\circ$ ,  $D=64$  mm,  $L=2,500$  mm)에 대한 비틀림 모멘트-각도 변화를 보인 것이다. ( $\theta=15^\circ$ ,  $D=64$ mm,  $L=2,500$  mm)의 경우 비틀림 모멘트가 증가할수록 비틀림 각도의 예측치와 시험치의 오차가 커짐을 보였다. 그러나 전반적으로 시험결과와 구조해석의 결과가 비교적 잘 일치함을 볼 수 있으며, 이를 통해 구조해석의 정확도를 확인할 수 있었다.

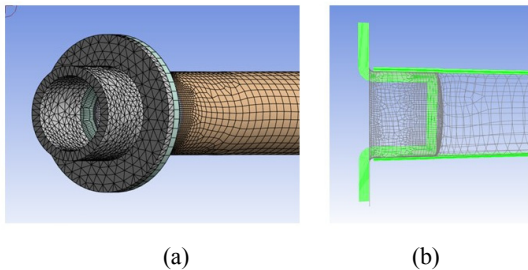


Fig. 6 Solid model for FEA analysis: (a) attached metal hub to the composite flange; (b) bonded composite flange to the tube

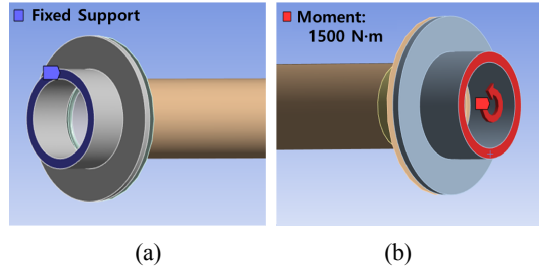


Fig. 7 Boundary conditions at (a) fixed end; (b) loading end

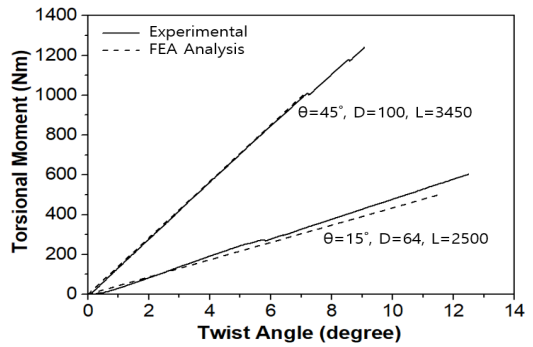
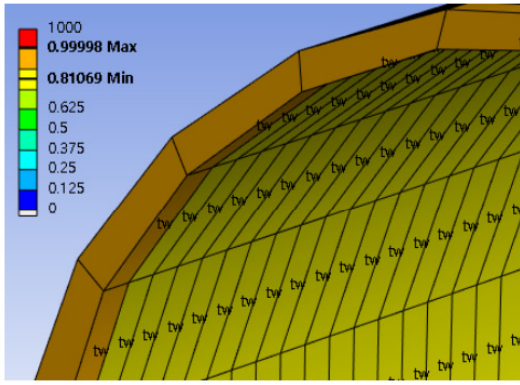


Fig. 8 Comparison of experimental and numerical results of torsional moment-twist angle curves for two cases of composite tubes

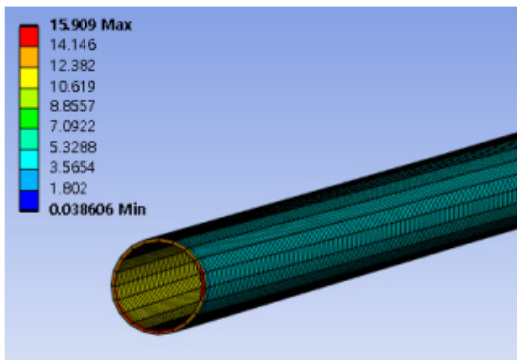
### 5. 복합재의 비틀림 강도 해석

구조 강도 해석에서는 튜브직경 64 mm, 길이 2,500 mm에 대하여 헬리컬 와인딩 각도  $\theta$ 의 변화( $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ )에 따른 복합재 튜브의 비틀림 강도를 예측하였다. 적층복합재료의 파손여부를 확인하기 위한 파손기준(failure criteria)은 금속 재료에 사용되는 Maximum stress, Maximum strain criteria와 함께 복합재료의 파손기준인 Tsai-Wu 및 Tsai-Hill theory를 적용하였으며, 4개의 파손기준 중 어느 하나라도 파손지수가 1을 초과할 때 복합재료가 파손되는 것으로 가정하였다.

Fig. 9(a)는 와인딩 각도  $45^\circ$ 의 경우 복합재 튜브의 파손지수 분포를 보인 것으로, 복합재 전체 두께에 1 이하의 파손지수를 보일 때 최대 강도를 계산하였다. Fig. 9(b)는 최대 강도일 때 파이프에 분포하는 응력 상태를 보인 것이다. 세 가지 와인



(a)



(b)

Fig. 9 (a) Failure index distribution and (b) stress distribution of 45° winding angle composite tube

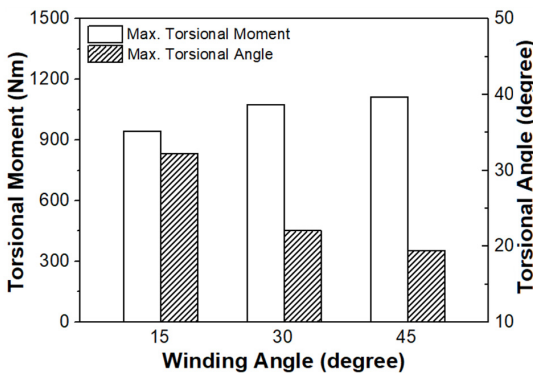


Fig. 10 Comparison of max. torsional moment and twisting angle for three cases of winding angles

딩 각도에서 파손지수가 1에 도달할 때의 최대 비틀림 모멘트와 최대 비틀림 각도를 계산한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 와인딩 각도가 증가할수록 최대 비틀림 모멘트가 증가하였으며, 최대 비틀림 각도는 감소하는 경향을 보였다. 이는 45°의 경우가 비틀림 강성이 가장 높았기 때문이다. 강도 해석 결과로부터 와인딩 각도 45°일 때 비틀림 모멘트가 우수하고 변형량이 작기 때문에 동력을 전달하기 위한 커플링 제작에 가장 적합함을 알 수 있다.

## 6. 결 론

냉각탑에 적용 가능한 탄소섬유/에폭시 복합재 튜브를 필라멘트 와인딩 공정에 의해 제조하였다. 동력 전달장치에 사용되는 커플링에서 정적 및 동적인 기계적 거동을 결정하는 가장 중요한 성능 지수인 비틀림 강성을 실험적으로 구하였으며, 구조해석을 통하여 최대비틀림 강도 및 최대비틀림 각도를 예측하였다.

1) 적층 순서  $[\pm \theta / 90 / \pm \theta / \pm \theta / 90]$ 를 가지는 복합재 튜브에서 와인딩 각도 ( $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ), 튜브 직경 ( $D = 64, 80, 100$  mm) 및 튜브 길이 ( $L = 1,040 \sim 3,450$  mm)의 변화에 따른 비틀림 강성을 비틀림 시험기를 사용하여 측정하였다. 비틀림 강성은 와인딩 각도가 45°이고, 길이가 짧고 직경이 클수록 증가함을 보였다.

2) 구조해석의 정확도를 확인하기 위해 대표적인 사양으로 와인딩 각도, 직경 및 길이가 각각 다른 복합재 튜브에 대한 해석 결과, 비틀림 모멘트-각도 변화가 시험 결과와 잘 일치함을 보였다.

3) 와인딩 각도 ( $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ )에 대한 강도해석 결과, 각도가 증가할수록 최대 비틀림 모멘트가 증가하였고, 최대 비틀림 각도는 감소하는 경향을 보였으며, 45°일 때 비틀림 모멘트가 최댓값을 보이고 변형량이 작기 때문에 동력을 전달하기 위한 커플링 제작에 가장 적합함을 알 수 있다.

## Author contributions

B. H. Kim; Investigation, Conceptualization, Supervision, Writing-original draft. T. Y. Kim; Fabrication, Methodology, Formal analysis. J. I. Yoon; Project administration, Writing-review & editing.

## References

1. B. H. Kim, T. Y. Kim and J. I. Yoon, 2023, "Design and Manufacturing of Composites Coupling for Cooling Tower", *Journal of Power System Engineering*, 27, 3, 97-104. (DOI:10.9726/kspse.2023.27.3.097)
2. B. S. Kim, B. H. Kim and J. B. Kim, 2004, "Composite Pressure Vessel for Natural Gas Vehicle by Filament Winding", *Composites Research*, 17(5), 1-6. (<http://www.compositesres.org/journal/archive/view/565>)
3. Y. G. Lee, J. S. Park, S. H. Kim, H. L. Kim, and S. J. Yoon, 2013, "Compression Behavior of Manufacturability Enhanced FRP-Concrete Hybrid", *Composites Research*, 26(1), 66-71. (<http://www.compositesres.org/journal/archive/view/889>)
4. S. J. Lim, C. D. Kong and H. B. Park, 2012, "A Study on Optimal Design of Filament Winding Composite Tower for 2MW Class Horizontal Axis Wind Turbine Systems", *Composites Research*, 25(2), 54-61. (<http://www.compositesres.org/journal/archive/view/852>)
5. T. K. Hwang, J. B. Park, H. G. Kim, Y. D. Doh and S. I. Moon, 2007, "Dome Shape Design and Performance Evaluation of Composite Pressure Vessel", *Composites Research*, 20(4), 31-41. (<http://www.compositesres.org/journal/archive/view/674>)
6. Badie M A, Mahdi E and Hamouda A M S, 2011, "An investigation into hybrid carbon/glass fiber reinforced epoxy composite automotive drive shaft", *Materials Design*, 32, 1485-500. (DOI:10.1016/j.matdes.2010.08.042)
7. Abu Talib A, Ali A, Badie M, Azida Che Lah N and Golestaneh A, 2010, "Developing a hybrid, carbon/glass fiber reinforced, epoxy composite automotive drive shaft", *Materials Design*, 31, 514-21. (DOI:10.1016/j.matdes.2009.06.015)
8. Colombo C and Vergani L, 2018, "Optimization of filament winding parameters for the design of a composite pipe", *Composites Part B: Engineering*, 148, 207-16. (DOI:10.1016/j.compositesb.2018.04.056)
9. Filho P. S, Almeida J. H. S and Amico S. C, 2017, "Carbon/epoxy filament wound composite drive shafts under torsion and compression", *J. Compos. Mater.*, 52, 1103-11. (DOI:10.1177/002199831772204)
10. I. F. Soykok1, A. R. Ozcan and H. Tas, 2019, "Evaluation of the failure responses of filament wound and pre-preg wrapped glass fiber/epoxy composite tubes under quasi-static torsional loading", *Mater. Res. Express* 6, 055307. (DOI:10.1088/2053-1591/ab0151)