

축어긋남이 있는 유연복합재 고속구동축의 특성 분석 Characterization of a Misaligned Supercritical Shaft of Flexible Matrix Composite

홍을표* · 신응수**

Eulpyo Hong, Eungsoo Shin

Key Words : Flexible matrix composite(유연복합재료), Supercritical driveshaft(초임계 구동축), Misalignment(어긋남), Whirling stability(선회 안정성), Rotating internal damping(회전내부감쇠).

ABSTRACT

This research is to investigate the performance of a flexible matrix composite driveshaft with respect to shaft design parameters such as the number of layers, ply orientations, and material properties. A finite element formulation is utilized to estimate the allowable misalignment under given driving torque, the maximum temperature at steady states, and external damping for ensuring whirling stability under supercritical speed. Results indicate that the system performance can be greatly affected by the shaft laminate parameters, especially the ply orientations. Several sets of shaft parameters that will provide satisfactory overall system performance are derived.

1. 서론

헬리콥터의 구동 시스템과 같이 입출력 축의 어긋남이 있는 경우, U-조인트와 같은 유연 커플링으로 축 어긋남을 보상하고 있으나 횡방향 진동 및 비틀림 진동에 대한 불안정성을 야기할 수 있다.^(1,2) 또한 커플링의 추가 등으로 구동계가 복잡해지며 유지 및 보수 비용도 증가하게 된다. 이러한 문제점을 획기적으로 개선할 수 있는 방안의 하나로 고강도의 섬유 성분과 이에 비해 아주 유연한 모재로 이뤄진 유연복합재료(Flexible matrix composite, FMC)를 이용한 구동 시스템을 들 수 있는데, FMC의 구성 조건에 따라 높은 비틀림 강도를 가지면서 동시에 높은 횡방향 유연성을 가짐으로써 U-조인트와 같은 커플링 없이도 축 어긋남을 흡수할 수 있다. 하지만 횡방향 유연성의 증가는 굽힘 진동에 대한 고유 진동수를 저하시키게 되는데 유연복합재료가 기존의 금속에 비해 내부 감쇠가 크다는 점을 고려하면⁽³⁾ 이러한 고유 진동수의 저하는 초임계 상태에서의 불안정성을 야기하게 된다. 따라서 일반복합재료를 이용한 구동축은 여러 차례 시도된 바 있으나⁽⁴⁻⁶⁾, 축 어긋남을 보상하기 위한 목적보다는 구동축의 경량화를 위해서 복합 재료를 이용하였다.

본 연구는 FMC의 특성 변화가 구동축의 유연

성 및 안정성에 미치는 영향을 분석하는데 목적이 있다. 이미 언급한 바와 같이 유연성과 안정성을 동시에 최적화시키는 것은 불가능하지만 복합재료의 적층(layer) 개수, 적층 방향 및 재료 특성의 변화에 따라 구동축의 동특성이 매우 다양하게 바뀔 수 있으므로 이들 파라미터들을 광범위하게 변화시키면서 가장 적합한 조건을 찾아내고자 한다.

2. 특성 해석

2.1 모델링

Fig.1은 본 연구의 해석 모델로서 FMC 구동축과 양단의 베어링, 그리고 이를 지지하고 있는 보와 끝단의 집중질량으로 구성되어 있으며 헬리콥터 구동 시스템을 단순화시킨 모델로서 시스템의 기하학적, 구조적 특성치들은 Table 1에 정리한 바와 같이 AH-64 헬리콥터에 근거하여 설정하였다.

FMC 구동축은 Classical laminate 이론을 적용하여 모델링하였으며 구동축의 내부 감쇠는 복소 탄성계수를 사용하여 모델링하였다. 구동축에

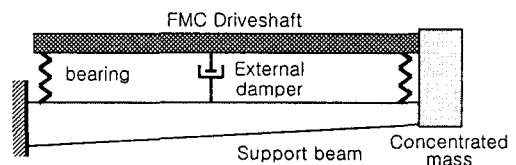


Fig. 1 Schematic of a tailrotor driveline

* 충북대학교 대학원
E-mail : hong23478@hanmail.net
Tel : (043) 261-3159, Fax : (043) 263-2448

** 충북대학교 기계공학부

Table 1 System properties

Component	Properties	Remark
FMC Shaft	Outer diameter: 0.11 m	Tube
	Length: 7.26 m	
	Offset from the beam -Longitudinal: 0.79 m -Vertical: 0.63 m	Fixed end
Support beam	Outer diameter -Vertical: 0.58 m -Horizontal: 0.45 m -Thickness: 1 mm	Elliptic tube Tapered: 2.2°
	Length: 8.05 m	
	Material: aluminum	
	Mass: 187.8 kg	
Concentrated mass	Offset from the beam -Longitudinal: -4.35 m -Vertical: 1.03 m -Horizontal: 0.12 m	Free end

Table 2 Drivetrain loadings

Type	Magnitude	Remark
Torque	489.4 N·m	
Misalignment (Beam tip)	Vertical -Displacement: 0.09 m -Slope: 2.1°	Thermal analysis only
	Horizontal -Displacement: 0.05 m -Slope: -1.1°	
Imbalance (Shaft middle)	Mass: 0.01% of shaft Eccentricity: 10% of shaft OD	Thermal analysis only

작용하는 하중으로는 한쪽 끝단에 작용하는 전달 토크와 지지보로부터 축의 횡방향으로 전달되는 하중이 있으며 Table 2 와 같이 AH-64 헬리콥터의 정상 상태 하중값을 사용하였다.

2.2 축 어긋남 해석

FMC 구동축의 유연성을 정량화하기 위하여 전달 토크가 작용하는 상태에서 허용 가능한 최대 어긋남을 Tsai-Wu criteria⁽⁷⁾를 적용하여 구했다. 이를 위한 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{q}\} + [G(\Omega)]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{Q\} \quad (1)$$

식(1)에서 $[M]$, $[G]$, $[K]$ 는 관성, 자이로스코픽, 강성 행렬이며, $\{q\}$ 는 횡방향과 축방향 변위, 굽힘과 비틀림각으로 구성된 변위벡터이다. 또한 Ω 는 축의 회전 속도이며 $\{Q\}$ 는 축에 작용하는 구동토크와 지지보에 작용하는 축어긋남 하중을 나타내는데 구동 토크는 Table2 에 설정한 바와 같

이 일정하게 유지시킨 상태에서 축어긋남 하중을 점진적으로 증가시키면서 구동축에 발생하는 응력이 Tsai-Wu 조건에 의한 허용응력과 같아질 때의 축 어긋남이 허용 가능한 최대값이 된다.

2.3 선회 안정성 해석

초임계 속도로 회전하는 FMC 구동축은 회전 내부 감쇠의 영향으로 항상 선회 불안정성을 갖게 되며 이를 방지하기 위해서는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 외부 감쇠기를 필요로 하게 된다. 안정성 해석에서는 FMC 파라미터의 변화에 따라 안정성 유지를 위해서 요구되는 최소 감쇠값을 구하여 이에 따라 구동축의 성능을 비교하였다.

우선 안정성 해석을 위하여 식(1)을 감쇠를 포함하는 식으로 변형하면 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C(\eta(T)) + G(\Omega)]\{\dot{q}\} + [K(\eta(T))]\{q\} = \{Q\} \quad (2)$$

여기서 내부 감쇠는 FMC 의 손실 계수(η)에 따라 결정되는데 이것이 온도의 함수가 된다. 동시에 뎀핑이 변하면 에너지 방출량이 달라지게 되어 이는 다시 구동축의 온도 변화를 초래하게 된다. 따라서 FMC 와 같이 내부 감쇠가 큰 경우 정확한 감쇠 예측을 위하여 열 해석을 통한 정상 상태에서의 온도를 구할 필요가 있다. 이를 위하여 유한 차분법을 적용한 열 평형 관계를 유도하면 아래와 같다.

$$k_d(T_n - T_{n-1}) + k_a(T_n - T_{n+1}) + k_v(T_n - T_\infty) = \dot{Q}_n \quad (3)$$

식(3)의 좌변에서 첫번째 및 두번째 항은 구동축에서의 열 전도 항이고 세번째 항은 구동축과 공기와의 대류를 나타내는 항이며 식(3)의 우변은 구동축 내부에서 감쇠에 의한 열 발생량을 나타낸다. 즉,

$$\dot{Q}_n = \frac{1}{2} \{q_n\}^T \cdot \eta(T)[K] \cdot \{q_n\} \quad (4)$$

따라서 온도에 따라 변하는 감쇠 특성은 식(2) - (4)를 동시에 만족하는 η 와 T 를 구해야 하며 본 연구에서는 이들 값이 수렴할 때까지 반복법을 적용하여 해를 구했다.

일단 η 가 정해지면 식(2)로부터 고유치 해석을 통하여 선회 안정성을 판별할 수 있다

$$[A] \equiv \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C+G] \end{bmatrix} \quad (5)$$

즉 [4]의 고유치의 실수부가 음의 값이면 계는 안정하지만 양의 값을 갖게 되면 불안정하게 되는데, 외부 댐퍼의 크기를 점진적으로 증가시켜 가면서 계가 안정 영역으로 돌아오는 최소의 감쇠 값을 구했다.

3. FMC 변수 분석

3.1 FMC 변수 설정

본 연구에서 고려하는 파라미터는 FMC의 적층 개수, 적층 방향, 적층 두께 그리고 재료 특성이다. 이 중에서 적층 개수는 4 또는 6으로 한정하고 $[\pm\theta_1/\mp\theta_2]$ or $[\pm\theta_1/\mp\theta_2/\pm\theta_3]$ 의 적층 순서에 대해 적층 방향을 변화시키면서 결과를 구했다. 한편 재료의 특성 변화는 복합 재료의 섬유 및 모재 성분에 대한 탄성 계수 및 손실 계수의 변화인데, Table 3에 나타난 바와 같이 4 종류의 복합 재료에 대해 구동축의 특성을 분석하였다. 여기서 재료 D는 전형적인 FMC 재료이고 재료 A는 일반 복합 재료에 해당하며 재료 B, C는 유연성 관점에서 비교할 때 위 두 재료의 중간에 속하는 재료이다.

3.2 적층 변수 vs. 구동축 특성

FMC의 적층 변수가 바뀔 때 따라 구동축의 특성이 어떻게 변화하는지를 분석하기 위하여 Table 3의 재료 D에 대해서 적층 방향을 바꿔 가면서 구동축의 허용 어긋남과 정상 상태의 온도

Table 3 Material properties

Material Properties		A	B	C	D
Modulus (GPa)	Longitudinal	153	153	115	115
	Transverse	10.5	2	0.7	0.359
	Shear	6.9	1	0.5	0.250
Poisson ratio		0.3	0.3	0.31	0.315
Loss factor	Longitudinal	0.008	0.009	0.011	0.011
	Transverse	0.018	0.070	0.090	0.114
	Shear	0.024	0.070	0.090	0.112
Yield strength (MPa)	Tensile ^a	1275	1275	958	958
	Compression ^a	892	764	526	479
	Tensile ^b	19	7	6	4
	Compression ^b	19	7	6	4
Shear		16	10	8	7

a: fiber direction

b: perpendicular to fiber direction

및 선회 안정성 유지를 위한 외부 감쇠의 최소값을 구한 결과를 Fig. 2와 3에 나타냈는데, Fig. 2는 적층 개수가 4인 경우이고 Fig. 3은 적층 개수가 6인 경우이다. 이 결과로부터 적층 방향이 변화함에 따라 구동축의 특성이 크게 바뀌는 것을 알 수 있는데 Fig. 2(a)를 보면 축 어긋남의 허용치는 적층 방향이 $[\pm 45^\circ/\mp 45^\circ]$ 일 때 최대가 되며 선회 안정성을 유지하기 위해 요구되는 외부 감쇠는 일 때 $[\pm 60^\circ/\mp 60^\circ]$ 일 때 최대가 된다. 이러한 결과는 FMC의 재료 특성과 밀접하게 연관되어 있는데, Fig. 4에 나타난 바와 같이 탄성 계수가 최소가 되는 적층 방향이 $[\pm 45^\circ/\mp 45^\circ]$ 이고 손실 계수가 최대가 되는 적층 방향이 $[\pm 60^\circ/\mp 60^\circ]$ 로써 Fig. 2(c)에서 외부 감쇠가 최대가 되는 조건과 일치함을 확인할 수 있다.

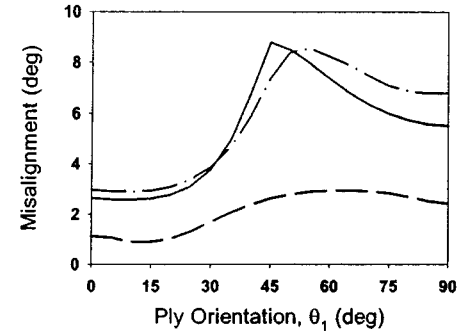
한편 Fig. 2와 Fig. 3을 비교해 볼 때 적층 개수를 늘리면 구동축의 특성이 많이 바뀌는 것을 알 수 있으며 FMC 구동축의 유연성과 선회 안정성이 반드시 상반되는 특성이 아님을 관찰할 수 있다. 즉, 유연성과 선회 안정성을 동시에 바람직한 방향으로 개선할 수 있는 적층 변수를 도출할 수 있음을 암시해주고 있다.

Fig. 5는 구동축의 두께의 변화가 구동축 특성에 미치는 영향을 나타낸 것인데 적층 방향 및 적층 개수와 달리 두께의 변화는 특성에 미치는 영향이 별로 없음을 관찰할 수 있다.

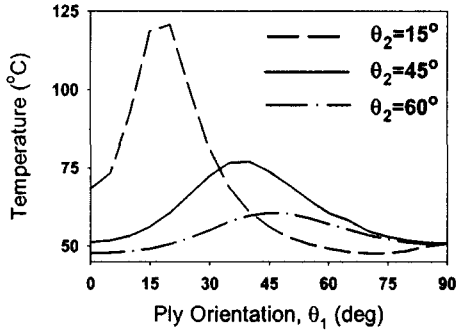
3.3 FMC 재질 vs. 구동축 특성

Fig. 6은 구동축의 재질의 변화가 구동축 성능 특성에 미치는 영향을 Table 3에 있는 바와 같은 4가지의 서로 다른 복합 재료에 대해서 적층 방향에 따라 도시한 것이다. 축 어긋남의 허용치는 재료 D가 다른 재료들에 비해 훨씬 크며 이는 횡방향 유연성이 월등하게 차이가 나기 때문이다. 반면에 구동축의 온도 변화를 보면 재료에 따른 차이가 그다지 크지 않은데 그 이유는 Fig. 7에 나타난 재료의 손실 모듈러스 및 횡방향의 동적 변위의 크기 등에 복합적인 영향을 받게 되는데 재료가 유연해 질수록 손실 모듈러스의 크기는 줄어드는 반면 동적 응답의 크기는 늘어나게 되어 이들의 결과적으로 발생하는 열은 별 차이가 없기 때문이다.

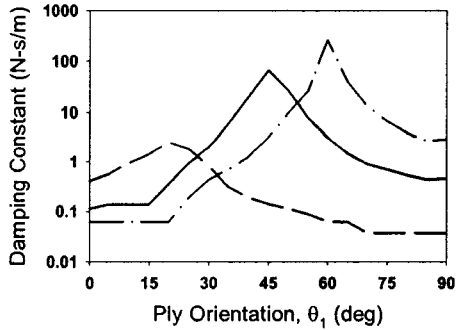
한편 선회 안정성은 재료에 따라 큰 차이를 보이는데 이는 재료가 유연해짐에 따라 횡방향의 고유 진동수가 낮아지게 되어 임계 속도가 낮아지며 동시에 내부 감쇠는 커지는 경향이 있는데 이러한



(a) Allowable misalignment

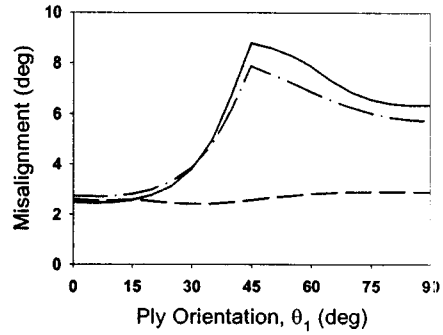


(b) Maximum shaft temperature

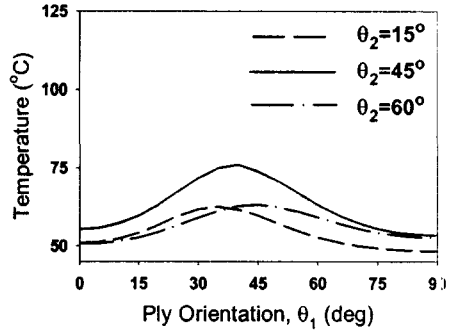


(c) External damping for stability

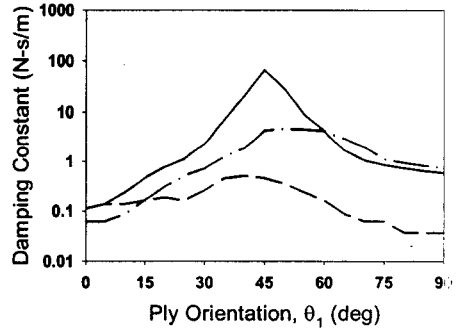
Figure 2 Performance of the laminate $[+\theta_1/-\theta_1/-\theta_2/\theta_2]$



(a) Allowable misalignment



(b) Maximum shaft temperature



(c) External damping for stability

Figure 3 Performance of the laminate $[+\theta_1/-\theta_1/-\theta_2/\theta_2/+45^\circ/-45^\circ]$

요인이 복합되어 계가 불안정하게 되기 때문이다.

3.4 최적 파라미터 도출

위의 결과들은 FMC 변수에 따라서 구동축 특성이 매우 다양하게 변화함을 보여주고 있으며, 전체적으로는 유연성의 증가는 안정성의 저하를 초래하는 경향을 보인다. 하지만 각각의 FMC 변수들의 영향을 주는 정도가 서로 다를 뿐 아니라 선형적이지 않기 때문에 특정 변수의 조합을 통해

서 유연성과 안정성을 동시에 개선시킬 수 있음이 가능함을 알 수 있다. Fig. 5로부터 축의 두께는 특성에 미치는 영향이 미미하므로 1.6 mm 로 고정시키고 재질 D에 대해서 적층 변수와 적층 방향에 대한 최적 조건을 유전자 알고리즘을 이용한 discrete optimization으로 구했다. Fig. 8은 그 결과를 보여주고 있는데 유연성의 저하를 방지하면서 선회 안정성을 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

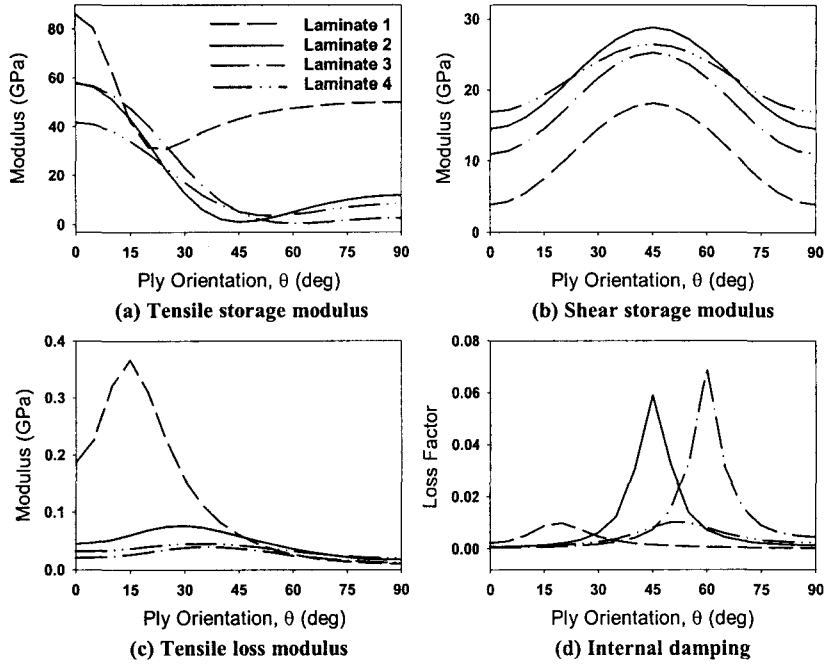


Figure 4 Shaft characteristics of the laminates: 1=[+θ/-θ/-15°/+15°], 2=[+θ/-θ/-45°/+45°], 3=[+θ/-θ/-60°/+60°], 4=[+θ/-θ/-60°/+60°/+45°/-45°]

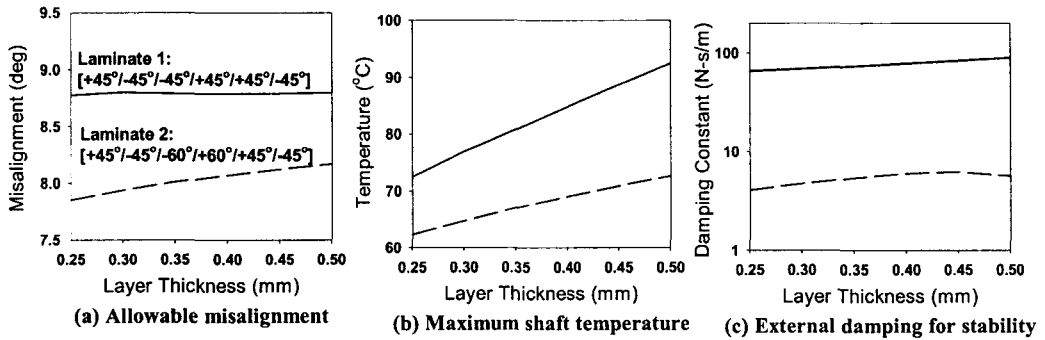
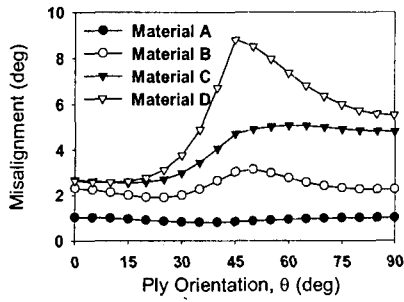
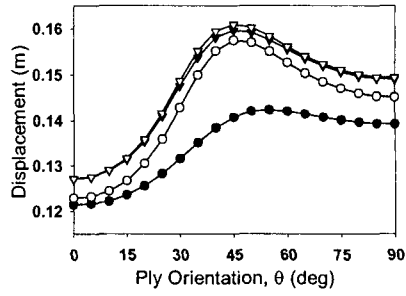


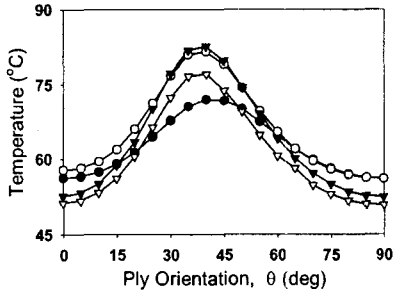
Figure 5 Performance vs. thickness



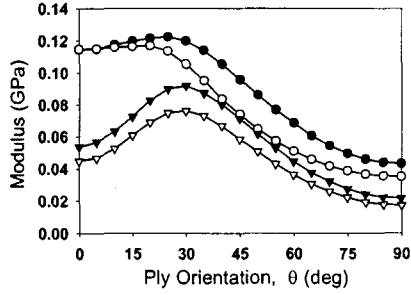
(a) Allowable misalignment



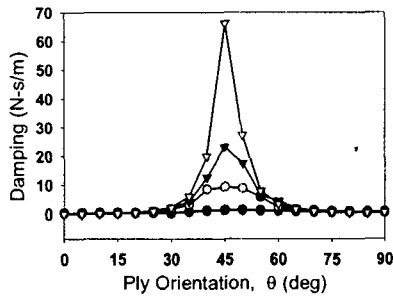
(a) Maximum response



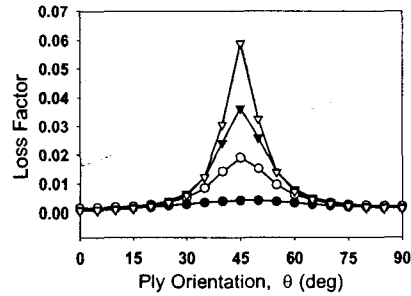
(b) Maximum shaft temperature



(b) Tensile loss modulus



(c) External damping for stability



(c) Internal damping

Figure 6 Performance vs. material (Laminate=[+θ/-θ/-45°/+45°])

Figure 7 Shaft characteristics vs. material (Laminate=[+θ/-θ/-45°/+45°])

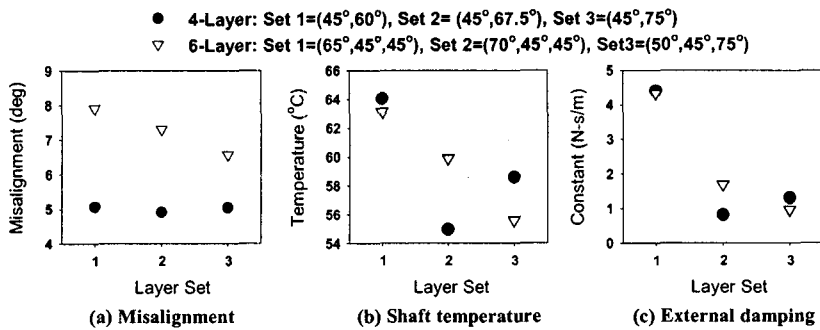


Figure 8 Tailored shaft parameters

4. 결 론

본 연구에서는 축 어긋남이 존재하는 구동 시스템에서 구동축을 횡방향 유연성이 우수한 FMC로 대체할 경우 구동축의 특성이 FMC의 적층 변수와 재질에 따라 어떤 영향을 받는지를 허용 가능한 축 어긋남과 초임계 상태에서 선회 안정성을 유지하기 위한 외부 감쇠를 고려하여 분석하였다. 그 결과 FMC 파라미터의 변화에 따라 구동축의 특성이 급격하게 변하는 것을 확인하였으며 유연성의 증가는 안정성의 저하를 초래하는 일반적인 경향이 있지만 파라미터의 적절한 조합에 따라 유연성과 안정성을 동시에 개선할 수 있음을 확인하였다. 향후 FMC 구동축의 본격 개발을 위해서는 다양한 FMC 재질에 대한 광범위한 특성 분석이 필요하며 본 연구는 그에 대한 기초 자료로 활용될 수 있다.

참고문헌

- (1) H. A. DeSmidt, K. W. Wang, and E. Smith, 2002, "Coupled Torsion-Lateral Stability of a Shaft-Disk System Driven through a Universal Joint," *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 69, No. 3, pp. 261-273.
- (2) Chen, L. and Peng, W., 1998, "The stability behavior of rotating composite shafts under axial compressive loads," *Composite Structures*, Vol. 41, pp. 253-263.
- (3) Crane, R.M., Santiago, A.L., Ratcliffe, C.P.; 1994, "Structural and Damping Characteristics of a Flexible Composite Shaft," *Journal of Materials for Noise and Vibration Control*, Vol. 80, pp.65-72.
- (4) Darlow, M.S., Creonte, J., 1995, "Optimal Design of Composite Helicopter Power Transmission Shafts with Axially Varying Fiber Layup," *Journal of American Helicopter Society*, Vol. 40, No. 2, pp50-56.
- (5) H. Z. ter Wijlen and E. de Boer, 1994, "Designing, manufacturing and testing of sub- and supercritical composite shafts for helicopter tail drive line applications," *Proceedings of the 20th European Rotorcraft Forum*, Amsterdam, Netherlands, Vol. 4, pp123-1 to 123-15.
- (6) Abrate, S., 1990, "Optimum Design of Composite Shafts," *Proceedings of the 5th Technical Conference, American Society for Composites*, East Lansing, MI, pp. 647-656.
- (7) Jones, R. M., 1976, *Mechanics of Composite Materials*, McGraw-Hill, New York, pp. 80-83.