

유연복합재 구동축의 동특성에 관한 실험 분석

신응수*

(논문접수일 2005. 11. 28, 심사완료일 2006. 2. 14)

Experimental Investigation Into the Dynamic Characteristics of Flexible Matrix Composite Driveshafts

Eung-Soo Shin*

Abstract

This study provides a comprehensive experimental study on the dynamic characteristics of a flexible matrix composite(FMC) driveshaft. A primary objective is to verify the analytic results of the FMC drivetrain based on the equivalent complex modulus approach and the classical lamination theory. A test rig has been constructed, which consists of a FMC shaft, a foundation beam, bearings, external dampers and a driving motor. The frequency response functions and transient responses are obtained from the external excitation and the spin-up testings. It turns out that the analytic results are in good agreement with the experimental ones.

Key Words : Flexible Matrix Composite(유연복합재료), Dynamic Characteristics(동특성), Misaligned Driveshaft(비직선 구동축), Rotating Internal Damping(회전내부감쇠), Equivalent Complex Stiffness(등가복소강성), Frequency Response Function(주파수응답함수), Spinup Response(과도응답)

1. 서론

복합재료 중에서도 모재의 유연성이 매우 뛰어난 유연복합재(flexible matrix composite: FMC)는 정상상태에서 횡방향 변위가 존재하는 비직선 구동축에 매우 효과적으로 적용할 수 있다^(1,2). 즉 기존의 U-조인트와 같은 유연 커플링을 사용하지 않고도 FMC 자체의 유연성으로 횡방향 변위를

흡수할 수 있어 구동계가 구조적으로 단순해질 수 있어 유지 보수의 시간 및 비용을 절감할 수 있을 뿐 아니라 유연 커플링이 야기하는 속도 변화에 따른 구동계의 불안정성을 해결할 수 있다⁽³⁻⁵⁾. 하지만 FMC 구동축의 횡방향 유연성 증가는 굽힘 진동에 대한 고유 진동수를 저하시키게 되므로 구동축의 임계 속도가 낮아지게 되고 이는 FMC의 회전 내부 감쇠(rotating internal damping)에 의해 초임계 조건에

* 충북대학교 기계공학부 (esshin@chungbuk.ac.kr)
주소: 360-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 12

서의 선회 불안정성이 발생할 수 있다^(6,7). 또한 횡방향으로의 큰 변형과 FMC의 높은 감쇠 특성으로 인하여 많은 열이 발생할 수 있고 이로 인한 구동축의 온도 변화가 FMC의 재료 특성에 변화를 가져올 수 있다.

따라서 FMC 구동축을 실현하기 위해서는 그에 대한 면밀한 동특성 분석이 선행되어야 한다. 일반적으로 복합재료 구동축의 해석에는 고전적층이론(classical lamination theory)에 근거한 유한요소법을 적용하며 대칭균형 적층구조(symmetric balanced laminate)의 가정하에 FMC 재료특성은 등가 물성치로 모델링한다⁽⁸⁾. 하지만 FMC와 같이 섬유와 모재의 재료적 특성이 현저하게 차이가 나는 경우에 이러한 등가 모델링이 해석 결과에 미치는 영향에 대해 분석한 사례는 아직 없는 실정이다.

본 논문에서는 FMC 구동축을 포함한 실험 장치를 설계·제작하고 이에 대한 동특성 실험을 수행하여 그 결과를 유한요소 해석 결과와 비교 분석함으로써 FMC 등가 재료 모델링의 타당성을 검토하고자 한다.

2. FMC 구동계의 동특성 분석 실험

2.1 실험 장치 개요

FMC 구동축의 동특성 분석을 위한 실험 장치는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 FMC 구동축, 지반보(foundation beam), 외부 감쇠기, 구동 모터 및 가진기로 구성되어 있다. FMC 구동축은 탄소섬유 T700과 폴리우레탄 L100으로 구성되며 2개의 세그먼트로 이뤄져 있다. 각각의 세그먼트는 길이 31.25 in, 외경 0.375 in, 두께 1mm이고 균형대칭인 [$\pm 45^\circ / \mp 90^\circ$]_s의 적층 구조를 가지며 각 세그먼트는 강체 커플링에 의해 서로 연결되어 있다. FMC 구동축은 베어링을 통하여 지반보에 의해서 지지되며 지반보는 한쪽 단은 핀 형태로, 다른 끝단은 스프링에 의해 지지된다.

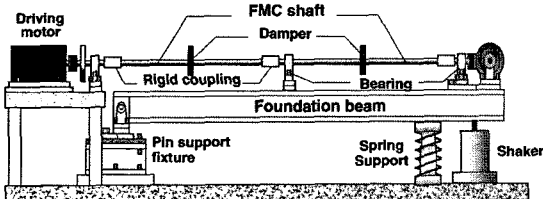


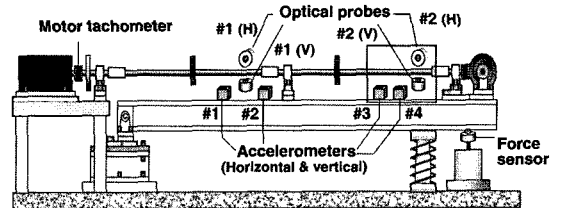
Fig. 1 Schematic of the test rig

2.2 동특성 실험

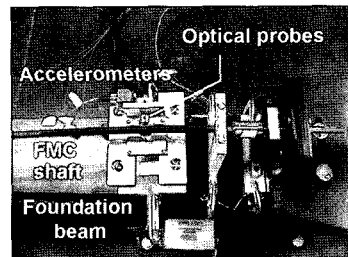
FMC 구동축의 동특성을 분석하기 위한 실험으로서 가진기를 이용하여 지반 가진의 주파수를 변화시키면서 구동축과 지반보의 주파수응답함수를 구하는 실험과 구동축의 회전 속도를 증가시키면서 불평형 질량에 의한 구동축의 과도 응답을 구하는 가속회전(spin-up) 실험을 각각 수행한다.

Fig. 2는 각각의 실험에서 FMC 구동축 및 지반보의 응답과 가진 조건 등을 측정하기 위한 센서들을 나타낸 것이다. FMC 구동축의 경우 횡방향 변위를 측정하기 위하여 수직 및 수평 방향을 1 세트로 하여 2 세트의 광학변위센서(optical probe: OP)를 베어링으로부터 3 in 떨어진 지점에 설치하였으며 지반보의 경우 4개의 가속도계를 부착하여 각각의 가속도계로부터 지반보의 수직 및 수평 방향의 가속도를 측정한다. 한편 지반 가진 실험에서 가진력을 힘센서로부터 측정하였으며 과도회전 실험에서 구동축의 회전속도는 모터에 내장된 타코미터를 사용하여 측정한다.

FMC 구동축의 횡변위를 OP로 측정하기 위해서는 먼저 OP의 보정이 필요하다. 그 이유는 FMC 표면에 대한 OP의 감도가 주어지지 않을 뿐 아니라 FMC 구동축이 원형 단면이어서 OP의 수평 및 수직 방향의 변위 신호 중 상도 간섭에 의한 성분이 존재하므로 이를 규명해야 하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3 (a)에 나타난 바와 같이 FMC



(a) Overview



(b) Detailed view

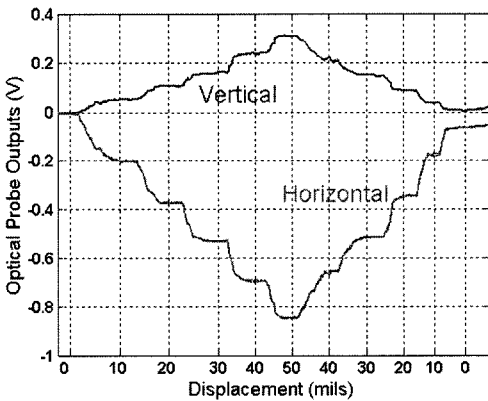
Fig. 2 Experimental setup for measurement

구동축에 수평 방향의 변위를 $\Delta\delta_H = 0.01$ in씩 증가시키면서 가할 때 수평 및 수직 방향의 OP 출력 신호증감(ΔO_{HH} , ΔO_{VH})와의 관계를 평균적으로 아래와 같이 구한다.

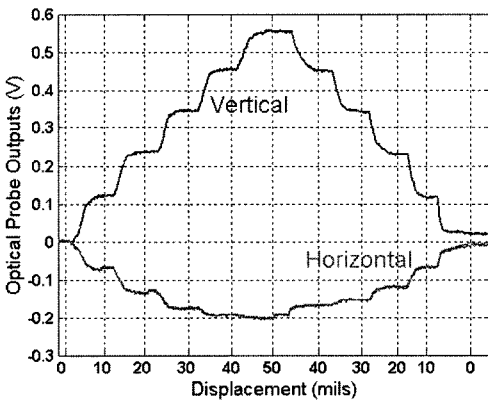
$$K_{HH} = \text{mean}\left(\frac{\Delta O_{HH}}{\Delta\delta_H}\right), K_{VH} = \text{mean}\left(\frac{\Delta O_{VH}}{\Delta\delta_H}\right) \quad (1)$$

마찬가지로 수직 방향에 대해서도 동일한 과정을 반복하여 K_{HV} , K_{VV} 를 구하고 최종적으로 수평 및 수직 방향 OP의 신호(O_H , O_V)로부터 FMC 구동축의 수평 및 수직 방향 변위(δ_H , δ_V)를 구하는 관계식을 아래와 같이 구했다.

$$\begin{Bmatrix} \delta_H \\ \delta_V \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{HH} & K_{HV} \\ K_{VH} & K_{VV} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} O_H \\ O_V \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.072 & -0.028 \\ 0.040 & 0.105 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} O_H \\ O_V \end{Bmatrix} \quad (2)$$



(a) Horizontal increment



(b) Vertical increment

Fig. 3 Calibration of the optical probes

식 (2)에서 probe 감도의 단위는 in/V이며 수평 방향의 감도가 음으로 나온 것은 수평 변위의 양의 방향이 OP에 접근하는 방향이기 때문이다.

3. 등가 물성치를 이용한 FMC 구동축의 이론 해석

3.1 유한요소해석 모델

Fig. 1의 실험장치에 대한 동특성 해석을 수행하기 위하여 FMC 구동축과 지반보는 절점당 6자유도를 갖고 절점이 2개인 요소로 모델링하되, 구동축의 경우 회전에 따른 자이로스토프 효과가 반영되도록 하였다. 또한 베어링, 강체 커플링, 지반보 양단의 핀 지지부 및 스프링 지지부는 상세 구조 해석을 수행하고 그 결과에 근거하여 절점당 6자유도를 갖고 절점이 2개인 스프링 요소로 모델링하였다. 이외에 기어 박스, 외부 감쇠기, 센서 고정 지그 및 OP 보호용 덮개 등은 집중 질량으로 모델링하였다. 최종적으로 이론 해석을 위한 지배방정식은 아래의 형태로 주어진다⁽⁹⁾.

$$[M]\{\ddot{q}\} + ([C] + [G(\Omega)])\{\dot{q}\} + ([K] + [K_R])\{q\} = \{F\} \quad (3)$$

여기서 $[M]$, $[C]$, $[G]$, $[K]$, $[K_R]$ 는 각각 질량, 감쇠, 자이로스토프, 강성 및 회전내부감쇠 행렬이고 $\{F\}$ 는 외부 하중 벡터이다.

3.2 FMC의 등가 재료 물성치

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 FMC 구동축에서 평면 힘과 변형률 사이에는 다음 관계식이 성립한다⁽⁸⁾.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

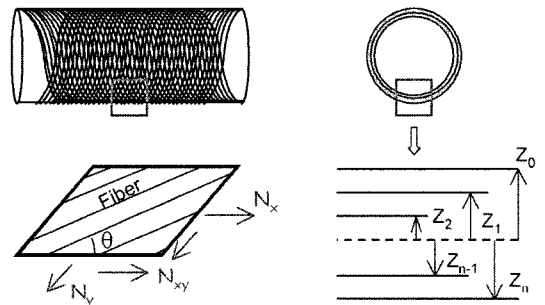


Fig. 4 In-plane force resultant of the FMC shaft

Table 1 Material properties of T700/L100

Properties		Value
Modulus (GPa)	Longitudinal	115
	Transverse	0.139
	Shear	0.250
Loss factor	Longitudinal	0.011
	Transverse	0.114
	Shear	0.112

식 (4)에서 [A]는 아래와 같이 주어진다.

$$[A] = \sum_{k=1}^n \{ [T]^{-1} [Q]_k [T]^{-1} (z_k - z_{k-1}) \} \quad (5)$$

식 (5)에서 [T]는 적층각(θ)에 따른 변환 행렬이고 [Q]는 섬유와 모재의 재료 물성치에 따라 주어지는 행렬로서 T700과 L100의 물성치는 Table 1과 같다⁽¹⁰⁾. 최종적으로 FMC 구동축의 등가탄성계수와 등가전단계수는 다음과 같이 복소 형태로 나타낼 수 있으며 식 (3)의 운동방정식의 강성 및 감쇠 행렬을 유도하는데 사용된다.

$$E_{eq} = E(1 + i \cdot \eta_E) = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{t \cdot A_{22}} \quad (6)$$

$$G_{eq} = G(1 + i \cdot \eta_G) = \frac{A_{66}}{t} \quad (7)$$

4. 결과 분석

4.1 지반 가진에 의한 주파수 응답 특성

Fig. 5는 지반 가진에 대한 주파수 응답 함수를 나타낸 것으로서 FMC 구동축의 수직 및 수평 방향으로의 변위 응답과 지반보의 수직 및 수평 방향으로의 가속도 응답을 실험으로부터 측정 결과와 해석 결과를 비교하여 도시한 것이며, Table 2는 각 정점에서의 모드 특성을 정리한 것이다.

Table 2의 결과를 보면 계의 모드는 지반보의 거동이 지배적으로 나타나는 1,2차 모드, FMC 구동축의 거동이 지배적으로 나타나는 3,4차 모드, 그리고 FMC 구동축과 지반보 사이의 상호 연성에 의해 나타나는 복합적인 거동의 고차 모드로 분류할 수 있다. 주파수 응답 함수에서 정점이 발생하는 주파수와 크기를 비교해 보면 일부 모드를 제외하고는 대체적으로 실험 결과와 해석 결과가 잘 일치함을 관찰할

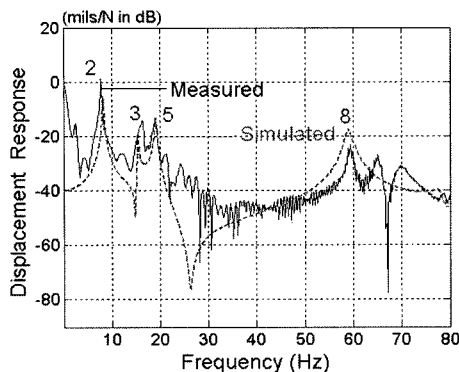
Table 2 Modal characteristics

Mode no.	Descriptions	Frequency* (Hz)
1	Foundation beam (Horizontal, 1 st)	5.5
2	Foundation beam (Vertical, 1 st)	8.3
3	FMC shaft (Vertical, 1 st)	15.8
4	FMC shaft (Horizontal, 1 st)	16.3
5	Coupled (Vertical, 1 st)	19.2
6	Coupled (Horizontal, 1 st)	20.3
7	Coupled (Horizontal, 2 nd)	24.3
8	Coupled (Vertical, 2 nd)	59.4
9	Coupled (Horizontal, 3 rd)	60.4
10	Coupled (Horizontal, 4 th)	65.8
11	Coupled (Horizontal, 5 th)	76.2

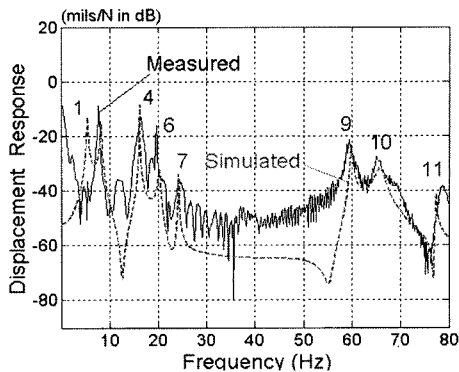
*: Simulation results

수 있다. 1차 모드의 경우 지반보의 수평 방향 모드인데 Fig. 5 (d)에 보이는 바와 같이 지반보의 가속도 응답함수는 실험 측정치와 해석 결과가 잘 일치하고 있으나 구동축의 OP로부터 얻은 변위 응답 함수에서는 큰 차이가 발생하였다. 이는 OP의 설치용 지그를 I형 단면의 지반보 플랜지에 클램프로 고정하였는데 지반보의 수평 방향 거동을 완전하게 전달하지 못한다기인한 것으로 보인다. FMC 구동축과 지반보의 연성 모드 중에서 큰 차이를 보이는 6차 모드의 경우, 지반보의 비틀림 모드가 중첩되어 나타나게 되는데 1차 모드와 마찬가지로 OP 지그의 불완전한 클램핑이 오차의 주 원인으로 판단된다. 또한 FMC 구동축을 지지하는 3개의 베어링도 지반보 위에 클램핑되어 있는데 베어링의 지지 조건이 구동축의 동특성에 미치는 영향이 아주 크기 때문에 베어링의 불완전 고정 역시 해석 결과와 실험 결과의 차이에 영향을 준 것으로 보인다.

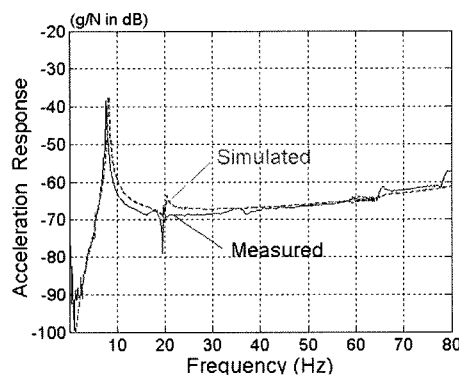
반면 지반보의 거동이 거의 없는 경우 해석 및 실험으로부터 얻은 주파수 응답함수의 정점에서의 주파수 및 크기는 잘 일치함을 알 수 있다. 다만 시스템의 감쇠를 나타내는 정점 부근에서의 응답 폭을 비교해 보면 거의 모든 경우에 있어 실험 결과가 해석 결과에 비해 큰 감쇠를 나타내고 있다. 이는 해석 모델에서 고려하지 못한 여러 감쇠 요인, 예를 들면 강체 커플링에서의 마찰 등이 실험 결과에 영향을 주었기 때문인 것으로 보인다.



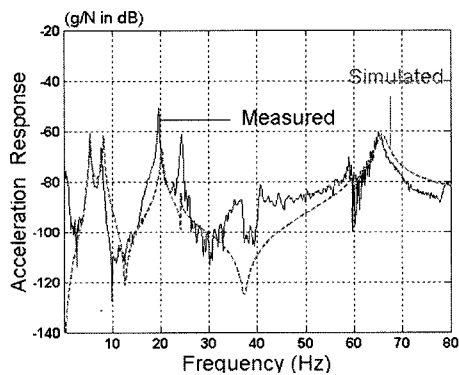
(a) Optical probe #1(Vertical)



(b) Optical probe #1(Horizontal)



(c) Acceleration #1(Vertical)



(d) Acceleration #1(Horizontal)

Fig. 5 Frequency response functions

4.2 과도 응답 특성

Fig. 6은 FMC 구동축의 회전 속도를 점점 증가시키면서 과도 응답을 구한 결과를 도시한 것이다. 앞 절에서의 주파수 응답함수와 달리 지반보는 정지된 상태에서 구동축의 거동만이 일어나기 때문에 FMC 모델링을 검증하기에 용이하다. 특히 식 (6), (7)로 나타낸 복소 형태의 등가 물성치 중에서 FMC의 등가 손실 계수를 검증하는데 효과적이다.

가속회전실험에서 속도의 범위는 FMC 구동축의 1차 고유주파수 948rpm(=15.8Hz)에 91%에 해당하는 865rpm까지로 설정하였고 5.766rpm/s의 크기로 가속하였다. 이론 해석에서는 4차의 Runge-Kutta 방법을 사용하여 수치 적분하였으며 구동축의 횡방향 변위를 발생시키는 편심 질량으로는 강체 커플링의 비대칭으로부터 발생하는 편심량을 적용하였다.

그 결과를 보면 Fig. 6에 나타난 바와 같이 모터의 회전 속도가 구동축의 1차 고유주파수에 접근함에 따라 응답이

급격하게 증가하는 것을 실험에 의한 측정 결과와 해석에 의한 결과에서 모두 확인할 수 있다. FMC 구동축의 내부 감쇠 등 재료 특성이 이러한 과도 응답의 크기 변화에 직접

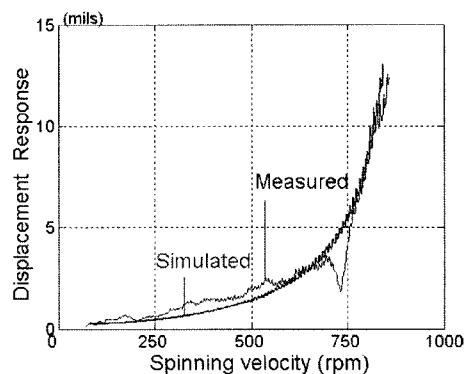


Fig. 6 Transient responses

적인 영향을 미치는 점을 고려하면 등가 물성치에 의한 FMC 구동축의 모델링은 타당한 것으로 보인다.

따라서 앞 절에서 언급한 구동축 이외의 오차 요인에 의해 발생하는 차이를 제외하면 본 연구에서 검증하고자 하는 등가 재료 물성치 모델링에 의해 발생하는 차이는 크지 않은 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 유연복합재 구동축의 해석에서 등가 재료 물성치에 근거한 모델링의 타당성을 검증하기 위하여 지반 가진에 의한 주파수 응답 함수와 및 회전 속도 변화에 의한 과도 응답을 실험 및 해석을 수행하여 각각 구하고 그 결과를 비교 분석하였다. 그에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 등가 재료 물성치에 의한 FMC 구동축의 해석 모델로부터 얻은 결과는 지반 가진 실험 및 과도 회전 실험을 통하여 측정된 결과와 대체적으로 잘 일치하였다. 따라서 FMC와 같이 섬유와 모재의 재료 특성이 현저히 차이나는 경우에도 등가 재료 물성치 모델링에 의한 해석은 타당한 것으로 보인다.
- (2) 지반 가진에 의한 주파수 응답 함수에서 일부 모드에서의 특성 차이가 발생하였으나 FMC 모델링 이외의 요인에 기인한 것으로 보이며 광학변위 센서의 고정 조건 등 실험 방법을 개선할 경우 그 차이는 줄어들 것으로 보인다. 따라서 본 연구의 타당성 검증에 미치는 영향은 거의 없다.
- (3) 본 연구의 결과는 향후 FMC 구동축의 최적 설계를 수행하기 위한 기초 자료로서 활용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Heterington, P. L., Kraus, R. F. and Darlow, M. S., 1988, "Demonstration of a Supercritical Composite

Helicopter Power Transmission Shaft," *Proceedings of the American Helicopter Society National Technical Specialist's Meeting on Advanced Rotorcraft Structures*, pp. 25~27.

- (2) Hong, E. and Shin, E. 2004, "Characterization of a Misaligned Supercritical Shaft of a Flexible Matrix Composite," *Trans. of the Korean Society for Noise and Vibration*, Vol. 14, No. 1, pp. 32~39.
- (3) Mazzei, A., Argento, A. and Scott, R., 1999, "Dynamic Stability of a Rotating Shaft Driven through a Universal Joints," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 222, pp. 19~47.
- (4) DeSchmidt, A., Wang, K. and Smith, E., 2002, "Coupled Torsional-Lateral Stability of a Shaft-Disk System Driven through a Universal Joint," *J. of Applied Mechanics*, Vol. 69, No. 3, pp. 261~273.
- (5) Melanson, J. and Zu, J. W., 1998, "Free Vibration and Stability Analysis of Internally Damped Rotating Shafts With General Boundary Conditions," *Journal Vibration and Acoustics*, Vol. 120, pp. 776~783.
- (6) Crane, M., Santiago, A. and Radcliffe, C., 1994, "Structural Damping Characteristics of a Flexible Composite Shaft," *J. of Materials for Noise and Vibration Control*, Vol. 80, pp. 65~72.
- (7) Rikards, R., 1993, "Finite Element Analysis of Vibration and Damping of Laminated Composites," *Composite Structures*, Vol. 24, pp. 193~204.
- (8) Gurda, Z., Hafka, R. and Hajel, P., 1999, *Design and Optimization of Laminated Composite Materials*, John-Wiley & Sons, pp. 73~83.
- (9) Zorzi, E. and Nelson, H., 1977, "Finite Element Simulation of Rotor-Bearing Systems with Internal Damping," *ASME J. of Engineering for Power*, Vol. 44, No. 1, pp. 71~76.
- (10) Shen, Y. and Bakis, C., 2002, "Static and dynamic characterization of a flexible matrix composite material," *Proc. of American Helicopter Society 58th Forum*, Montreal, Canada, pp. 222~227.