

압전 재료를 이용한 프로펠라 샤프트 능동진동제어

Vibration Damping System of Propeller Shafts using Piezoelectric Materials

이재문*·이득원*·최승복**·조명우**·이철희†

Jae-Mun Lee, Deuk-Won Lee, Seung-Bok Choi, Myeong-Woo Cho, Chul-Hee Lee

1. 서 론

자동차 프로펠라 샤프트로부터의 진동은 자동차에서 진동과 소음을 발생시키는 중요한 요소들 중의 하나이며, 프로펠라 샤프트의 공진으로 인한 진동은 운전자에게 불편한 느낌을 들게 한다. 이러한 차량 프로펠라 샤프트의 진동문제를 해결하기 위해 프로펠라 샤프트에 대한 연구가 필요하며 여러 곳에서 연구가 수행되었다. 본 연구는 현행의 수동적인 방식이 아닌 능동적이며 효과적인 제어 시스템을 제시하고자 한다.

제어 시스템에는 진동제어에 많이 사용되는 압전 재료가 사용되었다. 압전 세라믹 타입의 작동기는 곡면형상 구조물의 적용에 어려움이 있어서 프로펠라 샤프트에 적용하기 어려움이 있다. 따라서 다른 압전 재료들보다 고탄력성을 가진 MFC(Macro Fiber Composite)가 작동기로 사용되었다.

원통셸 이론에 의하여 분석모델이 제공되었고, 감소효과를 확인하기 위해 유한요소법이 사용되었다. 자동차 샤프트의 진동제어를 적용하기 위한 가능성을 입증하기 위하여, 실제 실험은 비공진주파수 영역과 같은 공진상태에서 수행되었다.

2. 이론적 모델

일반적으로, 자동차의 프로펠라 샤프트는 빔 이론을 기반으로 한 중공의 원통형상을 가지는 샤프트를 사용한다. 실제 프로펠라 샤프트는 회전속도가 증가함에 따라 휨 모드뿐만 아니라 비틀림 모드도 나타나게 되는데, 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해 셸 이론을 이용한 방법을 제시하였다. 셸 구조물의 변형은 선형적이

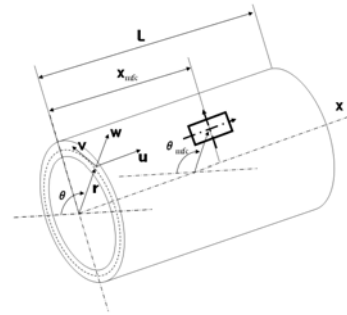


Fig. 1 Coordinates of cylindrical hollow shell

라고 가정하고, 구조물들은 등방성구조라 가정하였다. 이러한 가정 하에 Donnell-Mushtari 셸 이론을 이용하여 프로펠라 샤프트에 대한 운동방정식을 유도할 수 있으며, 유도된 운동방정식의 정확성을 판단하기 위해 중공축의 위험속도를 구하는 식 (1)을 이용하여 모델을 검증하였다.

$$\omega = \frac{\pi}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}} \quad (1)$$

$$J = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4), \quad A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$$

식 (1)을 통해 계산된 위험속도는 1,334 rad/s이고, 이 결과는 운동방정식을 통해 구한 공진주파수인 1,331 rad/s와 매우 유사하다.

3. 시뮬레이션 결과

1) 압전-열 유추 분석

본 연구에서 제안된 진동 감쇠 시스템의 성능을 분석하기 위해 프로펠라 샤프트의 유한요소 모델을 기반으로 한 컴퓨터 시뮬레이션이 사용되었지만 압전 효과를 유한요소법으로 표현하기에는 다소 무리가 있다. 이를 해결하기 위해 압전-열 유추 분석기법을 사용하였다. 압전-열 유추 분석은 압전 효과로 생기는 변위를 열에 의한 팽창과 같다고 가정하여 가해지는 전압 차를 온도변화로 변환하고, 압전 상수를 열팽창계수로 치환하여 유한요소법을 수행하는 분석기법이다. 식 (2)는 압전 효과

† 교신저자; 인하대학교 기계공학부
E-mail : chulhee@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7311, Fax : (032) 868-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 기계공학부

와 열팽창 효과 사이의 관계에 대한 식이다.

$$d_{3i} \frac{\Delta V}{t} = \alpha_i \Delta \Theta \quad (2)$$

2) 주파수 해석

유한요소모델을 사용하여 압전-열 유추 분석기법을 수행하였다. Fig. 2 는 1,500 Volt의 전압을 MFC에 인가하였을 때와 인가하지 않았을 때를 비교한 것이다. 주파수 1,306 rad/s 에서의 변위는 1.73mm에서 1.54mm로 감소하였음을 알 수 있다. 이를 통해서 MFC를 통한 능동진동제어 시스템의 가능성을 확인하였다.

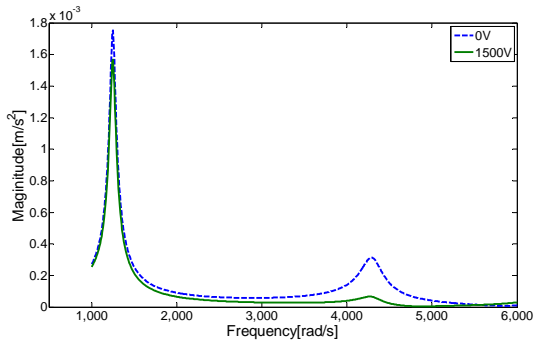


Fig. 2 Simulation results of frequency analysis

4. 실험장치

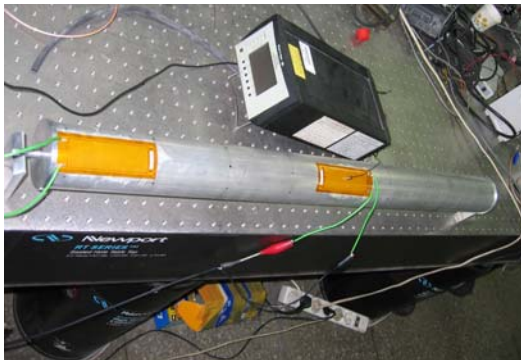


Fig. 3 An aluminum propeller shafts with MFC actuators

프로펠라 샤프트의 진동제어성능을 확인하기 위해 Fig. 3 의 실험 장비를 구축하였고, 실험에는 PID 컨트롤러를 사용하였다. 실험장비의 샤프트 재질은 알루미늄이고 3개의 MFC 액추에이터를 프로펠라 샤프트의 외부에 부착하였다. PC에서 정의한 신호가 dSPACE로 전달되어 전압의 형태로 신호가 발생한다. 발생한 신호는 고전압 증폭기를 통해 증폭되어 가진용 MFC를 작동시키고 프로펠라 샤프트는 진동하게 된다. 센서로는 가속도 센서가 사용되어 구조물의 진동을 측정하였으며, 센서로 측정된 신호는 A/D 컨버터를 통해 컴퓨터로 전송된다.

Fig. 4 는 1st 모드 형상을 가지고 공진주파수(51Hz)에 해당하는 가진을 주었을 때 액추에이터에서의 진동실험 결과를 나타낸다.

Fig. 4(a) 는 진동 입력이 사인신호일 때를 나타내고 이 신호는 전압증폭기에 의해서 150배 증폭되어 입력 전압의 크기는 1,500V가 된다. Fig. 4(b) 는 MFC 액추에이터의 제어 입력이고, Fig. 4(c) 는 센서신호를 나타낸다. 이 센서 신호는 고유진동 주파수영역의 진동감쇠 효과를 나타내며, 3단계로 나눌 수 있다. 첫 단계는 비 입력 신호이며 잡음신호만이 존재한다. 가진 신호는 2단계부터 시작되며 5Hz에서 51Hz로 변화한다. 이 결과는 능동 구조는 가진 주파수에 상관없이 영향을 미친다는 것을 의미한다.

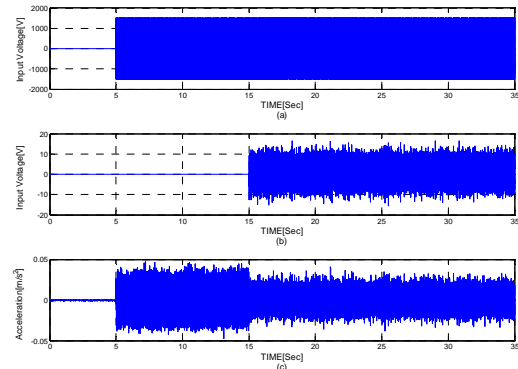


Fig. 4 Control results at resonant region:
(a) Vibration input, (b) Control input,
(c) Experimental results

5. 결 론

본 연구는 MFC 작동기를 이용한 프로펠라 샤프트의 능동진동제어 시스템을 제안하였다. 진동 억제에 위한 액추에이터로서 MFC를 사용하였다. 수학적인 모델은 쉘 이론에 근거하여 성립되었고, 유한요소해석을 통해 능동진동제어 시스템의 모델이 개발되었다. 고유진동 주파수 영역에서의 진동제어결과, 진동이 감소한 것을 확인할 수 있었으며 이러한 결과들은 자동차 프로펠라 샤프트에서 MFC를 사용하였을 때 최적의 진동감쇠 능력을 보여주었다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.