

# 에어제트 직기에 가해지는 가진력 추정 Indirect force identification of air-jet weaving machine infrequency domain

정의일† · 전두환\* · 노석홍\*\*

Jung Eui-Il, Chun Du-Hwan and No Suk-Hong

**Key Words :** 가진력 추정(indirect force identification), 제직기(weaving machine)

## ABSTRACT

For the effective reduction of structural vibration level it is important to obtain the exciting force components. But, sometimes direct force measurement is infeasible due to the geometric limitation of sensor placement. In this case, indirect force identification becomes useful tool for obtaining input force information. In this paper, indirect force technique was applied to air-jet weaving machine and shows some numerical results.

## 1. 서론

구조물에 가해지는 동적 가진력이나 전달력의 정보는 구조물의 설계, 제어, 동적 해석, 이상 진단 등에 매우 중요하다. 그러나, 센서의 설치 및 유지 등의 문제로, 가진력을 직접 측정하는 것은 매우 어렵거나 때론 불가능한 경우가 많다. 그러나 구조물에서 발생하는 진동 신호는 상대적으로 측정이 용이한 경우가 대부분이다. 이때, 측정된 진동 신호와 전달 경로의 정보로부터 가진력을 간접적으로 예측하는 것은 매우 실용적이고 유용한 방법이 된다.

가진력 추정 연구는 주파수 영역에서 수행되기도 하였으며 [1,2], 모달 영역에서 수행되기도 하였다 [3]. 가진력을 추정하기 위해서는 시스템의 정보인 주파수 응답 함수 또는 모달 정보가 필요하다. 즉, 가진력이 가해지고 있으리라 예상하는 점에서 주파수 응답 함수를 측정하는 것이 필요하다. 또한 시스템의 작동 중 변형 형상(ODS)을 측정하여야 한다. 이 두 가지 요소인 주파수 응답 함수와 작동 중 변형 형상으로부터 가진력을 얻을 수 있다. 그러나 시스템 행렬의 역으로부터 구할 수 있는데 가진력은 행렬의 오차에 민감하게 되는 약점이 있다 [3]. 본 연구에서는 가진력 추정 이론을 에어제트 직기에 적용하여 보고, 구동 주파수에서의 가진력 성분을 조사하였다

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 가진력 추정 이론

구조물에 작용하는 가진력의 간접적인 규명은 가진력의 수와 구조물의 모델링에 따라 달라지게 되므로 가진력의 규명에 앞서 이에 대한 검토가 필요하다. 일반적으로 선형 구조계에서 임의의 위치에서 복수의 가진력이 작용할 때 응답벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{X(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\} \quad (1)$$

여기서  $\{X(\omega)\}$ 는 응답 벡터이며,  $[H(\omega)]$ 는 시스템의 특성인 주파수 응답 함수이며,  $\{F(\omega)\}$ 는 가진력 벡터이다. 대개 실제의 하중은 분포적으로 작용하는 것이 보통이지만, 이산적으로 몇 군데의 가진점에서 집중힘이 작용한다고 가정할 수 있다. 그러므로 최소자승오차개념으로 하중을 추정할 때 추정 가진력 벡터를  $\{\hat{F}(\omega)\}$ 라 하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{\hat{F}(\omega)\} &= [H(\omega)]^* \{X(\omega)\} \\ &= ([H(\omega)]^T [H(\omega)])^{-1} [H(\omega)]^T \{X(\omega)\} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 \*는 복소 전치 행렬을 의미한다.  $[H(\omega)]^*$ 는 전달함수 행렬의 일반화된 역행렬로 가진력의 수와 응답 측정의 수가 같을 때 정방행렬의 역행렬이 된다. 가진력을 추정하고자 할 때는 응답측정의 수가 하중의 수보다 많거나 같아야 최소자승오차의 개념으로 구할 수 있다. 주파수 행렬  $[H(\omega)]$ 는 실험적인 방법으로 직접 측정할 수도 있고, 모우드 모델이나 유한 요소모델을 이용하여 얻을 수도 있다. 가진력을 추정하기 위해서

† 한국섬유기계연구소 인증시험팀  
E-mail : jung\_ei@kotmi.re.kr  
Tel : (053) 819-3123, Fax : (053) 819-3119

\* 한국섬유기계연구소 소장

\*\* 한국섬유기계연구소 연구 실장

는 가진력이 작용하는 지점과 측정하고자 하는 응답지점 사이의 주파수 응답 행렬  $[H(\omega)]$ 의 모든 요소를 얻어야 한다. 이때 행렬  $[H(\omega)]$ 을 정확하게 얻게 된다면 대수방정식을 이용하여 가진력을 쉽게 얻을 수 있다. 그러나 실험으로 주파수 응답 함수를 구하는 경우, 보통 한 열만 측정한다. 그러므로 전체 주파수 응답 함수 행렬을 구성하기 위해서 측정된 한 열로부터 모우드 정보를 추출하여 전체주파수 응답 함수를 모우드 합성하여 사용하기도 한다. 구조물의 고유치는 실험적으로 혹은 해석적인 방법을 통해 얻을 수 있으며, 주파수 응답 함수는 고유치로부터 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$[H(\omega)] = [\Psi_r][\Omega(\omega)]^{-1}[\Psi_r]^T \quad (3)$$

여기서  $[\Psi_r]$ 와  $[\Psi_r]^T$ 는 측정점과 가진점에서의 모우드 형상 행렬이며 고려되는 모우드의 수가  $r$  개라면  $[\Omega(\omega)]$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$[\Omega(\omega)] = \begin{bmatrix} s_1 & & \\ & \ddots & \\ & & s_r \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$s_i = \omega_i^2 - \omega^2 + 2\xi_i \omega_i \omega, \quad i=1,2,\dots,r$$

모달 정보로 합성된 주파수 응답 함수(3)을 식(2)에 대입함으로써 가진력 벡터  $\{F(\omega)\}$ 을 최소 자승 오차 개념으로 구할 수 있다. 오차를 최소로 줄이기 위해 다음의 두 가지 조건을 만족해야 한다. 첫째로 고려되는 모우드의 수  $r$ 이 가진력의 수  $p$ 보다 크게 설정하며( $r > p$ ), 측정 응답의 수  $m$ 이 고려되는 모우드의 수  $r$ 보다 크게 설정해 주어야 한다( $m > r$ ).

## 2.2 응답 측정

응답 벡터  $\{X(\omega)\}$ 는 정상상태의 경우 작동중 변형 형상을 측정함으로써 구할 수 있다. 작동중 변형 형상은 구조물의 거동을 나타내는 것으로 그림 1과 같이 기준 변위에 대한 상대적 변위를 측정함으로써 구할 수 있다. 상대적 변위를 구하기 때문에 최소한 두 개 이상의 가속도를 동시에 측정할 필요가 있다.

작동중 변형 형상(ODS, operational deflection shape)을 얻기 위한 간단한 방법은 다음과 같이 기준점에 대한 측정점의 전달률  $T_{xy}(\omega)$ 을 측정함으로써 구할 수 있다

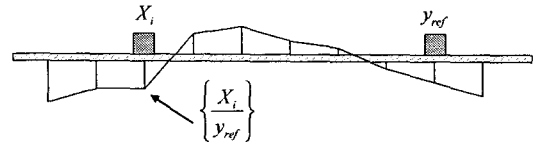


그림 1 작동 중 변형 형상 측정

$$T_{xy}(\omega) = X(\omega)/y(\omega) = S_{xy}(\omega)/S_{yy}(\omega), \quad i=1,2,\dots,m \quad (5)$$

여기서  $S_{xy}(\omega) = X(\omega)y^*(\omega)$ ,  $S_{yy}(\omega) = y(\omega)y^*(\omega)$ 는 각각 크로스 스펙트럼 오토 스펙트럼을 나타낸다.  $y$ 는 기준점을 나타내며,  $m$ 은 측정점의 수 그리고  $\omega$ 는 주파수를 나타낸다. 위에서 구한 전달률에 기준 변위  $y(\omega)$ 를 곱하여 응답 벡터  $\{X(\omega)\}$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\{X(\omega)\} = T_{xy}(\omega)y(\omega) \quad (6)$$

식(6)에서 구한 응답 벡터를 식(2)에 대입함으로써 가진력 벡터  $\{F(\omega)\}$ 를 구할 수 있다.

## 3. 에어제트 직트에 적용

연구의 대상이 되는 에어제트 직기는 공기를 이용하여 제직하는 직기로, 경사 위입의 역할을 공기가 수행한다. 직기 뒷편에 위사가 되는 실을 감아 놓고 경사가 되는 실을 공기로 실어서 위사 사이를 지나가게 만들어 제직을 하게 된다. 실험의 대상인 직기의 모습은 그림 2와 같다. 대부분의 섬유 기계들은 구동원으로서 구동 모터를 사용하고 있으며, 구동 모터에 연결된 폴리 및 기어에 의해서 모터에서 나온 회전력을 직기의 여러 조작 기능(개구, 위입, 바디침)이 가능하도록 구조로 이루어져 있다.

작동중 변형 형상 및 고유치 측정을 위한 측정점의 위치를 그림 2와 같이 48 점을 선정하였다. 모달 측정시의 가진점의 위치는 47 점이며, 임팩트 해머를 사용하여 모달 특성을 측정하였다. 가진점 47y 방향에 대한 주파수 응답함수를 구하고 모달 특성을 추출한 다음 모우드 정보를 합성하여 전체 주파수 응답 행렬을 구성하였다. 작동 중 형상 측정을 위한 기준점은 37 점을 선정하였다.

에어제트 직기의 첫 번째 고유 모우드는 그림 3과 같이 약 37.3Hz에서 좌우의 프레임이 서로 반대 방향으로 비틀리는 형상을 하고 있으며, 두 번째 모우드는 그림 4와 같이 약 52.7Hz에서 양쪽 프레임을 지지하는 지지부가 앞뒤로 흔들리는 굽힘 운동을 하고 있다. 표 1에

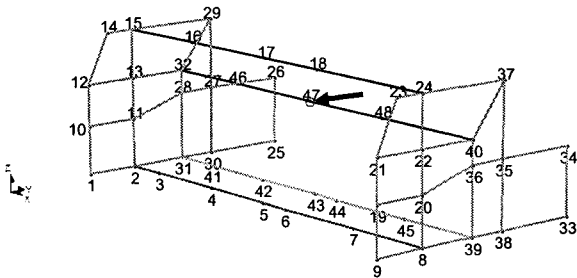
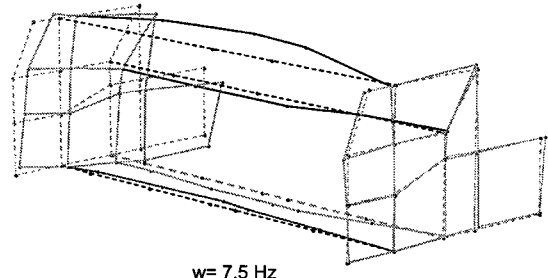
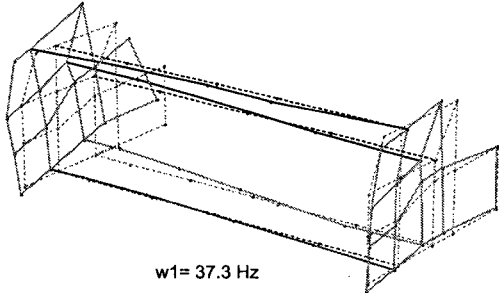


그림 2 에어제트 직기 및 모달 측정을 위한 가진점



$w = 7.5 \text{ Hz}$

그림 5 7.4Hz에서의 작동중 변형 형상



$w_1 = 37.3 \text{ Hz}$

그림 3 에어제트 직기의 첫 번째 고유모우드 형상

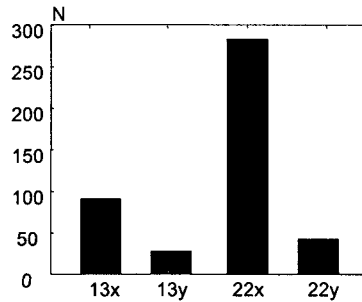
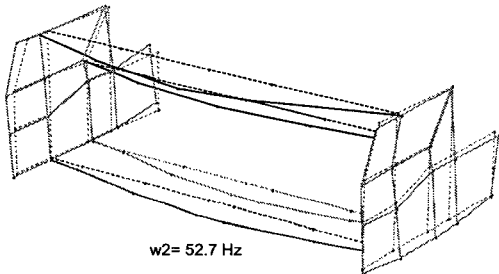


그림 6 위치에 따른 가진력의 크기(7.4Hz)



$w_2 = 52.7 \text{ Hz}$

그림 4 에어제트 직기의 두 번째 고유모우드 형상

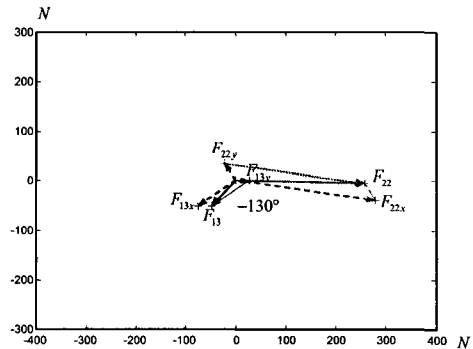


그림 7 가진력 벡터(7.4Hz=1X)

표 1 에어제트 직기의 고유 진동수

Mode	Natural freq.(Hz)	Damping(%)
1	37.3	6.71
2	52.7	8.05
3	61.4	7.31
4	75.7	5.07
5	114	2.59

5 개의 제트 직기의 고유 진동수와 댐핑값을 정리하였다.

에어제트 직기는 약 444rpm 은 구동되었으며 이는 약 구동 주파수 7.4Hz 에 해당된다. 7.4Hz에서의 작동중 변형 형상을 그림 5에 나타내었다. 좌측 프레임과 지지부가 함께 운동하는 형상으로 마치 첫 번째와 두 번째 고유 모우드를 합친 형상을 하고 있다.

모타에 의해 구동되는 회전축은 13 번과 22 번을 잇는 축에 가까이 있어 가진력의 위치 및

방향을 13x, 13y, 22x, 22y 으로 선정하여 보았다. 실험으로 구한 모우드의 수가 5 개이므로 가진력의 수를 5 보다 작게 설정하여야 최소 상승법으로 구할 수 있다. 그림 6에 13 점과 22 점에 작용하는 x 방향 및 y 방향의 가진력의 크기를 나타내었다. 13 점은 프레임의 좌측에 위치하며 22 점은 우측 프레임에 위치한다. 우측 프레임에 가해지는 가진력이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 가진력의 크기를 벡터 형식으로 나타내면 그림 7과 같다. 13 점에 작용하는 가진력  $F_{13}$  보다 22 점에 작용하는 가진력  $F_{22}$  이 크며, 서로 약 130°의 위상차를 보이며 가진되고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

주파수 영역에서 구조물에 가해지는 가진력을 간접적으로 추정할 수 있는 이론을 살펴보고, 에어제트 직기에 적용하여 보았다. 가진력 추정을 위해 주파수 응답함수 행렬을 사용하였으며, 실험적으로 구한 모달 특성을 합성하여 사용하였다. 가진력 추정 오차를 줄이기 위해서는 합성된 모우드의 수를 추정 가진수보다 크게 해야 하며, 에어제트 직기에 적용하여 보았다. 가진력 추정을 위한 응답 측정은 작동 중 변형 형상 측정을 통하여 수행하였으며, 구동 주파수에서의 에어제트 직기 변형 형상을 구하였다. 에어제트 직기의 회전축에 가까운 두 지점에 대한 가진력을 추정하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 "Air Jet Loom 의 고속화를 위한 성능 평가 기술 개발" 과제 연구비 지원에 의한 결과의 일부로, 이에 깊이 감사드립니다

#### 참고문헌

- (1) Fabumni, J. A., "Effects of Structural Modes on Vibratory Force Determination by the Pseudoinverse Technique", AIAA Journal, vol. 24, n. 3, 1986, pp. 504-509
- (2) John O'Callahan and Fabio Piergentili, "Force estimation using Operational Data", 14th IMAC, 1996, 1586-1592.
- (3) Ibrahim, S. R., Fregolent, A., Sestieri, A., "Structural Force Identification at Unmeasured Locations", 14th IMAC, 1996, 927-933.