

다기능 5축 복합가공기 램 헤드 모듈의 동특성 분석

김성민[†]·장성현*·김실근*·하종식**·최영휴***

Dynamic Characteristics Analysis of a 5-Axes Multi-tasking Machine Tool by using F.E.M and Impulse Hammer Test

S. M. Kim, S. H. Jang, S. G. Kim, J. S. Ha and Y. H. Choi

Key Words: 5-axes multi-tasking machine(다기능 5축 복합가공기), Ram head module(램 헤드 모듈),

Abstract

This paper describes a case study on dynamic characteristics analysis of a 5-axis multi-tasking machine tool of ram-head typed. Natural frequency and corresponding vibration modes of the machine tool structure were obtained by using both FEM modal analysis and an experimental modal test(impulse hammer test). Both the theoretical and experiment analysis results showed good agreement with each other. Finally, some discussion and review, from the view point of resonance vibration and/or mode coupled chatter, were made based on the analysis results.

1. 서 론

오늘날 기계가공에 있어서 다품종 소량생산, 변종변량(變種變量) 생산, 원가절감, 기능의 복합화에 따른 복잡한 형상 부품의 증가와 같은 요구에 대응하기 위해 다수의 공정이나 작업을 1대의 가공기계에서 수행할 수 있는 복합가공기가 각광을 받고 있다.

복합가공기(Multi-tasking machine)는 터닝센터(Turning Center)를 기본으로 하여 밀링(Milling), 드릴링(Drilling), 태핑(Tapping), 호빙(Hobbing), 연삭(Grinding) 등의 복합적인 가공기능이 부가된 방식과, 머시닝센터를 기본으로 하여 다른 가공기능이 부가된 방식으로 구분된다.

또한 복합가공기는 다양한 가공이 수행 가능해야 하므로 가공모듈의 결합형태가 복잡한 구조형상을 가지게 되며, 가공 방식에 따라 절삭력을 비롯한 작용력과 가진원(加振原)도 매우 복잡하고 다양하고, 각각의 가공 방식마다 운전속도도 달라지는 특성이 있다. 그러므로 다양한 진동 가진원과 운전조건에 대응하여 충분한 정밀도와 구조적 안정성을 유지할 수 있도록 설계하여야 하며, 이를 위한 구조 동특성 해석이 필요하다.

본 연구에서 대상으로 하는 5축 복합가공기(5-axes multi-tasking machine)는 대형 항공기 부품이나 선박 엔진 부품 등과 같은 대형 기계부품을 가공하는데 사용되는 가공기로서, Fig. 1에서처럼 5축 복합가공기는 램 헤드 모듈(Ram head module), 베드(Bed), 칼럼(Column), 슬라이드 유닛(Slide unit)으로 구성이 되며, 램에는 복합가공을 위한 여러 가지 가공유닛 모듈(machining unit modules: milling, hobbing, grinding, drilling)이 부착될 수 있다.

† 창원대학교 대학원

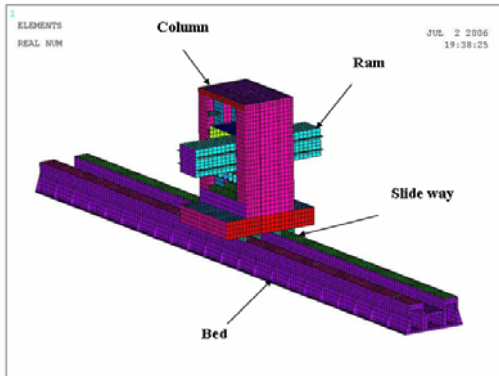
E-mail : iong100@changwon.ac.kr

TEL : (055)267-1107 FAX : (055)267-1107

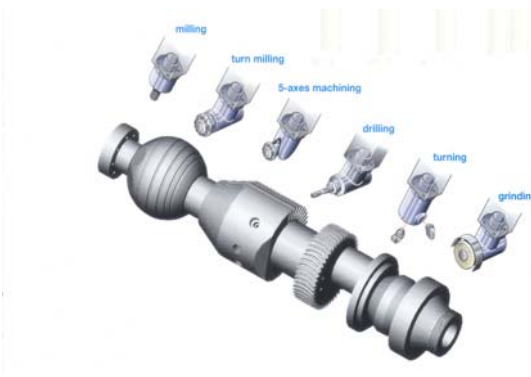
* 창원대학교 대학원

** 한국정밀기계(주)

*** 창원대학교 기계설계공학과



(a) 5-axes multi-tasking machine



(b) machining unit modules

Fig. 1 5-axes multi-tasking machine

다가능 5축 복합가공기의 램은 여러 가공유닛 모듈이 부착되어 가공이 실제적으로 일어나는 곳 이므로 가진력에 의하여 진동이 발생할 수 있다. 또한 Fig. 1의 (a)에서처럼 램은 외팔보 형태의 구조를 가지고 있으므로 자중이나 절삭력에 의한 처짐에 의해서 가공 정밀도에 영향을 미칠 수가 있다. 그러므로 램 헤드 모듈에 대하여 동특성을 파악하여 가진력에 의한 공진을 확인할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 5축 복합가공기의 램 헤드 모듈에 대한 FEM 해석과 제작된 램 헤드 모듈 단품에 대하여 가진 시험(Impulse hammer test)을 통하여 동특성을 확인하였다.

2. FEM 모드 해석

2.1 FEM 모델링

다가능 5축 복합가공기의 모드해석을 위하여 Fig. 2와 같이 17,976개의 절점(Node)과 18,832개의 쉘 요소(SHELL 181)로 구성되는 FEM 모델

링을 하였다. 또한 Table 1에 모델링 데이터를 정리하였다.

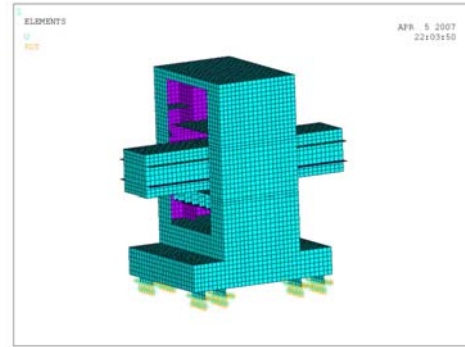


Fig. 2 FEM Modeling of Ram Head

Table 1 FEM modeling data

Element type	SHELL 181	
No. of node	17,976	
No. of element	18,832	
Boundary condition	Fixed all nodes at bottom	
Material constant	Young's modulus, E [GPa]	210
	Poisson' ratio, ν	0.3
	Density [kg/m^3]	7,833

3. 모달 이론 및 방법

3.1 모달 이론

구조물을 다 자유도계 구조감쇠로 가정하는 경우에 운동방정식은 (1)과 같은 형태로 주어진다.

$$[m]\ddot{x} + [k]\{x\} + i[h]\{x\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

조화 가진 강제진동의 경우는 식 (2)과 같이 된다.

$$([k] + i[h] - \omega^2[m])\{X\} = \{F\} \quad (2)$$

여기서, $[B(\omega)] = [k] + i[h] - \omega^2[m]$ 로 나타내며, 이것을 시스템 행렬(System matrix)라 한다.

그리고 식 (1)에서 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{X\} = [B(\omega)]^{-1}\{F\} \quad (3)$$

또는

$$\{X\} = [H(\omega)]\{F\} \quad (4)$$

여기서 $H(\omega)$ 는 전달함수로 시스템 행렬의 역행렬이다.

$$[H(\omega)] = [B(\omega)]^{-1} = \frac{adj[B(\omega)]}{\det[B(\omega)]} \quad (5)$$

$\det[B(\omega)] = 0$: Characteristic equation

식 (3)과 식 (4)에서 전달함수는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$[H(\omega)]^{-1} = [k] + i[h] - \omega^2[m] \quad (6)$$

그리고 비감쇠계와 마찬가지로 복소 모드벡터로 직교성을 만족하므로 다음의 관계식이 성립한다.

$$[\phi]^T[m][\phi] = [m_r] \quad (7)$$

$$[\phi]^T([K] + i[h])[\phi] = [k_r]$$

$$\text{where, } \frac{k_r}{m_r} = \lambda_r^2$$

식 (7)의 직교성을 이용하여 식 (6)의 양변에 $[\phi]^T$ 와 $[\phi]$ 를 곱하여 정리하면 주파수응답함수 행렬은 다음과 같다.

$$[H(\omega)] = [\phi] \left[\frac{1}{m_r(\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r\omega_r^2)} \right] [\phi]^T \quad (8)$$

식 (8)를 정리하여 각 주파수응답함수 $[H(\omega)]$ 의 성분으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h_{ij}(\omega) &= \sum_{r=1}^N \frac{{}_r\phi_i \cdot {}_r\phi_j}{m_r(\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r\omega_r^2)} \\ &= \sum_{r=1}^N \frac{{}_rA_{ij}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r\omega_r^2} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, N 은 행렬의 랭크이며 m_r 은 r 차의 모달 질량(modal mass), ω_r 은 r 차의 고유진동수이며 η_r 은 r 차 모드의 손실계수이다. 그리고 ${}_r\phi_i$ 와 ${}_r\phi_j$ 은 각각 r 차 모드벡터의 i, j 성분이며 ${}_rA_{ij} + \frac{{}_r\phi_i \cdot {}_r\phi_j}{m_r}$ 는 모달상수이다.

3.2 실험 방법 및 장치

다기능 5축 복합가공기 구조물의 램 헤드 모듈에 대한 고유진동수를 측정하고, 고유모드형상을 얻기 위해 모달 시험을 하였다. 시험 방법은 Fig. 5에서처럼 충격 망치 시험(Impulse hammer test)을 하였으며, SISO(Single Input & Single Output) 방법에 따라 가속도계를 램 헤드 모듈의 측정점에 부착하고, 충격 해머로 램 헤드 모듈을 가진하여, 가속도를 측정하였다. 측정된 가속도 신호는 FFT 분석기로 전달되고, 전달된 가속도신호로부터 각각의 가진점에 대한 주파수 응답 함수(Frequency response function)를 구하여 단품의 고유진동수를 측정하게 된다.

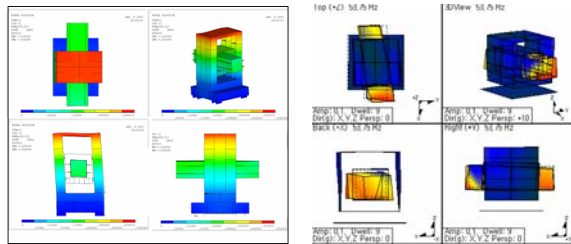


Fig. 3 Illustration of modal test setup

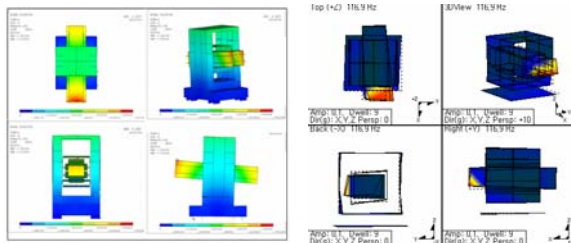
4. 측정 결과

4.1 결과 비교

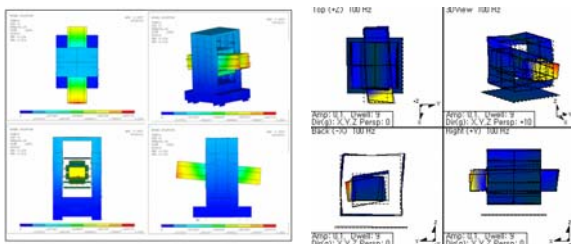
다기능 5축 복합가공기의 FEM 해석결과와 충격 가진 시험에 의한 결과 값을 Fig. 3에 나타내었다.



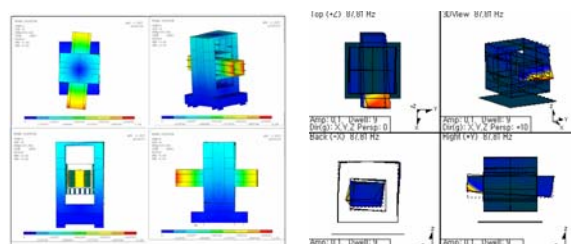
(1) FEM (2) Test
(a) The 1st mode



(1) FEM (2) Test
(b) The 2nd mode



(1) FEM (2) Test
(c) The 3rd mode



(1) FEM (2) Test
(d) The 4th mode

Fig. 3 Mode Shape of Ram Head

모드 해석결과 1차 모드는 램 헤드의 좌우 굽

힘 진동 모드가 발행했으며, 2차 모드는 램의 상하 굽힘과 비틀림 진동 모드가 발생했으며, 3차 모드는 램의 상하 굽힘 진동모드가 나타났다. 그리고 4차 모드는 램의 좌우 굽힘 모드가 나타났다. Table 2에는 램 헤드 모듈의 FEM과 실험에 따른 고유진동수를 비교하였다.

Table 2 Natural Frequency of Ram Head

	Natural frequency [Hz]	
	FEM	Experiment
1st	59.51	53.75
2nd	83.16	87.81
3rd	92.64	96.88
4th	107.06	116.9

본 논문의 다기능 5축 복합가공기는 3000 rpm 이하의 운전속도를 가지는 비하여, 램 헤드 모듈의 1차 고유진동수는 50 Hz 이상에서 나타나므로 가진력에 의한 공진은 발생하지 않게 설계되었다.

5. 결론

본 논문에서는 다기능 5축 복합가공기의 동특성을 파악하기 위하여 FEM을 통한 고유진동해석과 충격 망치를 이용한 가진 시험을 통해서 실제 제작된 램 헤드 모듈의 고유진동수를 측정하였다. 이를 통해 FEM과 실험에 따른 고유진동수가 10%이내의 차이를 보이며 거의 일치함을 알 수 있었다.

또한 본 논문의 결과에서처럼 다기능 5축 복합가공기의 운전속도는 램 헤드 모듈의 1차 고유진동수 영역에 있지 않으므로, 가진력에 의한 공진은 발생하지 않는다. 또한 외팔보 형태로 설계된 5축 복합가공기의 램은 자중이나 가진력에 의한 처짐 또는 진동에 의하여 가공 정밀도에 영향을 미칠 수가 있는데, 램 헤드 모듈의 2차, 3차 고유진동수는 5축 복합가공기 운전속도의 2배인 6000 rpm보다 낮기 때문에 2차, 3차 고유진동수에서 램의 상하 굽힘 모드가 5축 복합가공기의 정밀도에 많은 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역중점산업기술개발 사업의 일환으로 한국정밀기계주의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) T. J. Ko, W. I. Kim, H. S. Kim, D. S. Park, J. C. Lee, and M. W. Cho, 2005, Modern Machine Tools, Munundang, Seoul, pp. 54~82.
- (2) I. W. Baek, J. S. Kim, E. C. Jeon, N. K. Kim, M. S. Choi, and D. W. Lee, 2005, Machine Tools, Chungmun Books, Seoul, pp. 73~137.
- (3) S. I. Kim, D. B. Choi, J. P. Kang and N. K. Kim, 1995, Design Technique of the Latest Machine Tool, Bando Press, Seoul.
- (4) Y. H. Choi, S. H. Jang, I. S. Kim, Y. J. Cho, and C. W. Oh, 2006, "Structural Layout Design Alternative of a 5-Axes Multi-tasking Machine Considering Loop Stiffness," Proc. of KSMTE Spring Conference 2006, pp. 226~231.
- (5) D. J. Ewins., 1986, "Modal Testing: Theory, Practice and Application" Research Studies Press, second edition, pp 49~64.
- (6) Y. H. Choi, S. T. Kim, T. H. Kim, and J. K. Park, 2004, "Structural Design Optimization of a High Speed & High Precision Mold Machining Center Using Genetic Algorithm," Machine Engineering, Vol. 4, No.1-2, pp.139 ~ 149.
- (7) Y. H. Choi, S. H. Jang, I. S. Kim, Y. J. Cho, and C. W. Oh, 2006, "Structural Design Optimization of a Multi-Tasking Machine with 5-Axes," Proc. of KSMTE Spring Conference 2006, pp. 215~220.