

공작기계용 Chucking System의 안정성에 관한 연구

박종권*, 노승국*, 유중학**, 김문기**, 국정한***

A Study on the Stability of Chucking System for Machine Tools

J.K.Park*, S.K.Ro*, J.H.Yoo**, M.K.Kim**, J.H.Kook***

Abstract

The performances of cutting process is mostly affected by the characteristics of closed loop system constructed with machine tool structure, work piece and tools. The chucking system is very important component in this system to hold work piece correctly in various static and dynamic load condition. Therefore, chucking force and accuracy must be considered carefully, from these reason, this paper describes the stability of chucking system which preserve high stiffness and accuracy of machine tool system.

Key words : Chucking force(파악력), Dynamic compliance(동적 컴플라이언스), Self-excited vibration(자려 진동), FEM(유한요소법), Dynamic instability(동적 불안정성), Centrifugal force(원심력), Chatter vibration(채터진동), Modal test(가진시험)

1. 서 론

가공시스템에서의 가공성능은 공작기계의 구조성능 및 공구의 개별적인 요소에 의하여 영향을 받기도 하지만 무엇보다도 공작기계-공작물-공구로 연결되어 결합된 일련의 폐회로(Closed loop system)에 의한 영향이 특히 중요하다. 여기서 중요한 역할을 해주는 것은 이들 전체 시스템을 연결해주는 척(Chuck)으로서 외부의 여러 가지 작용하중에 장시간 노출되어 있다 하더라도 정적, 동적으로 정확히 연결해주는 기능을 갖추어야만 한다.⁽¹⁾

그러므로 공작기계의 척은 다음의 3가지 조

- * 한국기계연구원 공작기계그룹
- ** 한국기술교육대학교 기계금형과
- *** 한국기술교육대학교 산업기계과

건이 만족되는 구조로 설계되어야 한다.⁽²⁾

- 가공축 중심에 대해 공작물을 정확히 위치 결정할 수 있을 것
- 절삭력 성분이나 임의의 모멘트에 대해서도 공작물을 정확히 파악(Chucking Force) 할 수 있을 것.
- 절삭력과 반대방향으로 공작물이 회전운동을 원활히 할 수 있을 것.

따라서 공작기계의 척에서 가장 신중히 고려해야 될 사항은 파악력과 정밀도이며, 이를 위해 본 연구는 공작기계의 가공시스템에서 강성을 유지하면서 가공정밀도를 유지시킬 수 있도록 하는 척킹시스템의 안정성에 관하여 유압용 3-Jaw Power Chuck(10")을 대상으로 연구를 수행하였다.

2. 척의 변형과 파악 특성

2.1 동적 파악력

척이 고속회전시에는 조오(Jaw)에 원심력이 발생하여 척킹된 공작물에 파악력 감소에 따른 불안정성이 야기되면서 가공정밀도 저하를 초래하게 된다. 그러므로 척의 회전중에 발생하는 원심력의 합계는 초기 파악력의 2/3를 초과하지 않도록 설계를 하여야 하며 이에 의해 정상속도에서의 동적파악력은 초기파악력의 1/3이상 유지되도록 하여야 하나 조오의 질량, 회전반경, 공작물의 형상과 척킹시스템의 강성 등 여러 인자에 의해 파악력이 감소되는 비율은 달라지게 된다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 일반적으로 척이 ω 의 각속도로 회전할 경우에 동적파악력(F)은 식(1)과 같이 표현되며 여기서 F_0 는 초기 파악력, m_0 는 조의질량, r_0 는 조의 회전반경을 나타낸다.

$$F = F_0 - m_0 r_0 \omega^2, \quad 3F \geq F_0 \quad (1)$$

이에 따라 파워척에 대한 동적 파악력상태를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 스트레인 게이지형의 파악력 측정게이지를 이용하여 Fig. 2의 원리로 측정하였다.

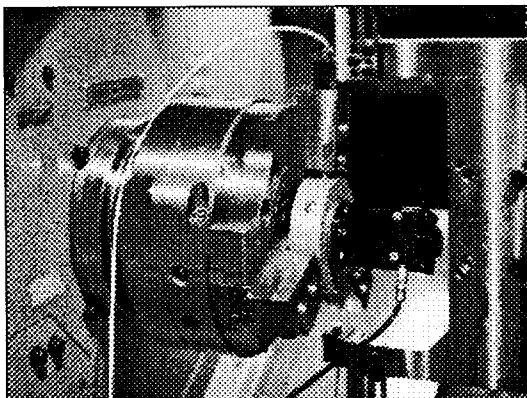


Fig. 1 Experimental set-up of chucking force displacement measurement

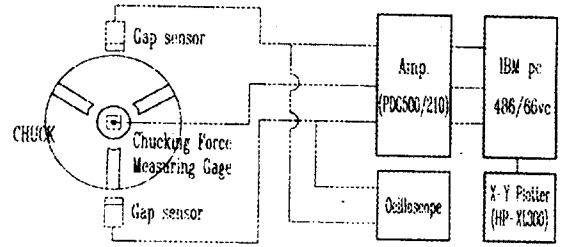


Fig. 2 Schematic diagram of measurement

따라서 척의 회전속도에 따른 파악력 특성은 Fig. 3과 같이 측정되었으며, 이를 볼 때 초기파악력은 약 26 kN이나 회전속도의 증가에 따라 약 2,000 rpm 이후부터는 급격히 감소하는 경향을 갖고 있고, 또한 정상속도(6,000 rpm)에 도달되어서는 10 kN으로서 초기파악력의 1/3이상 수준으로 잔존하는 특성을 가져 본 척은 동적파악력이 양호함을 볼 수 있다.

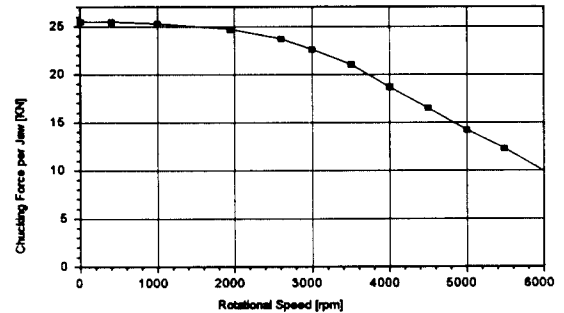


Fig. 3 Chucking force due to rotational speed

2.2 척 body의 변형

척이 고속회전을 할 경우에는 척 자중에 의한 원심력 영향으로 변형을 하게 된다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용한 이론해석과 실험을 통한 방법으로 척의 외주 변형특성을 측정하였다. 이론해석에 있어서는 Fig. 4와 같이 척 몸체에 대하여 유한요소로 모델링 한 것을 이용하였으며,⁽⁵⁾ 실험에 있어서는 Fig. 1과 같이 척 외주면에 설치된 2개의 비접촉 변

위 센서와 Fig. 2의 계통을 이용하여 측정을 하였다.

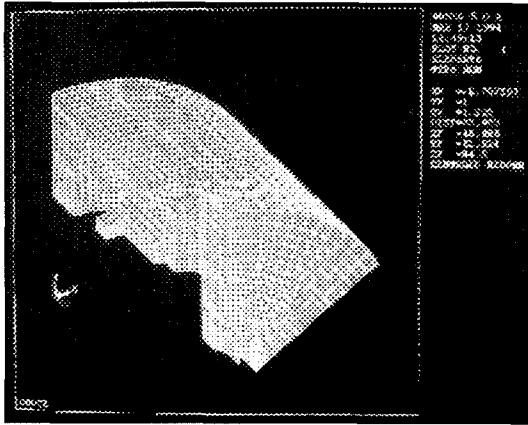


Fig. 4 FE-model of chuck

따라서 회전속도에 따른 척 본체 외주면의 변형량에 대해 측정한 결과를 Fig. 5에서 보여주며 이를 토대로 이론치와의 비교상태를 Table 1에 나타낸다.

Table 1. Comparison of calculation and experiment result for diametral expansion

회전속도(rpm)	이론치(mm)	실험치(mm)
3,600	0.0238935	0.0247
5,000	0.0579086	0.0592
6,000	0.0914403	0.0897

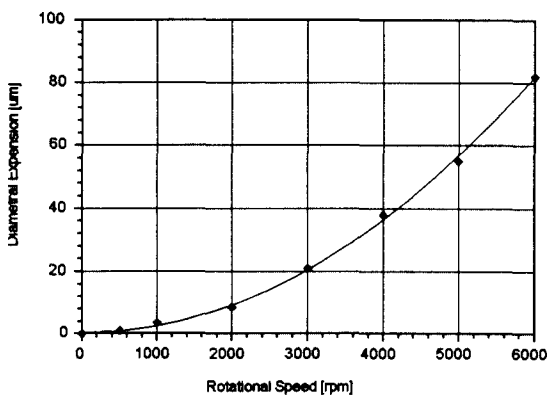


Fig. 5 Diametral expansion due to rotational speed

3. Chucking system의 동적안정성

일반적으로 가공시스템의 구성요소는 공작기계-공구-공작물로 이루어진 Fig. 6의 계통으로 설명할 수 있으며,⁽⁶⁾ 여기서 공구 및 공작물을 지지하는 요소부의 접점특성은 가공시스템 전체의 안정성을 결정하는데 중요한 인자로 작용된다.

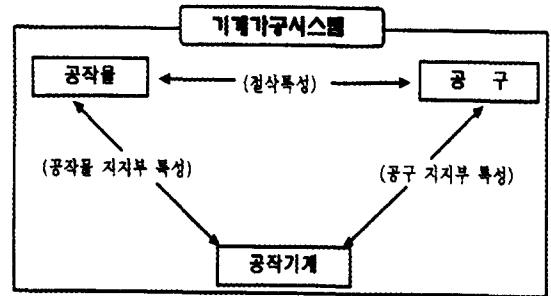


Fig. 6 Characteristics of machining process

즉, 절삭가공중 공구와 공작물사이의 상대진동은 가공능률을 저하시키게 되며, 여기에는 기계 본체의 강성뿐만 아니라 공구 및 공작물을 지지해주는 척(Chuck) 요소부의 접점 강성이 중요한 요소로 작용을 한다.

3.1 척킹시스템의 동특성

가진시험에 의한 척-공작물계의 동적 컴플라이언스는 Table 2의 실험조건을 토대로 Fig. 7의 실험방법과 같이 충격해머(Impact Hammer)에 의한 전달함수를 측정하는 것으로 수행하였으며, 척킹시스템에 영향을 주는 인자로서 파악력, 공작물의 가공위치를 고려하여 실시하였다. 즉 실험에 사용된 척은 3-Jaw 10"의 유압척으로서 유압에 의한 파악력을 여러종류로 설정하여 척 선단 위치로부터 가진점까지의 거리(L)를 증대시키면서 측정하였으며, 가진방향은 각각의 측정점에 대하여 절삭력 성분인 배분력 방향과 동일한 조건이 되

도록 공작물의 반경방향으로 가진력을 준후, 동시에 응답신호를 비접촉 변위센서로 측정하여 가진력과 응답신호 사이의 전달함수를 해석함에 의해 이루어졌다.

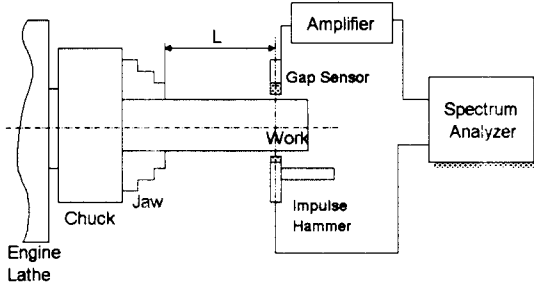
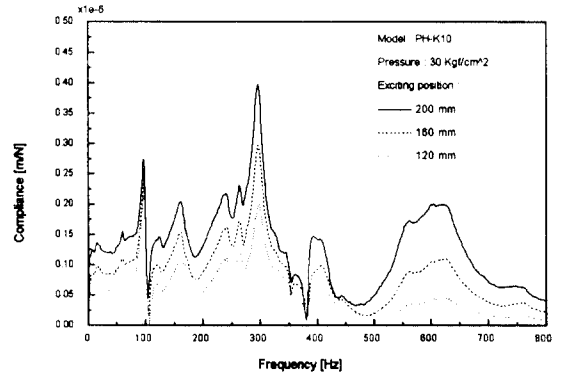


Fig. 7 Exciting test of chucking system

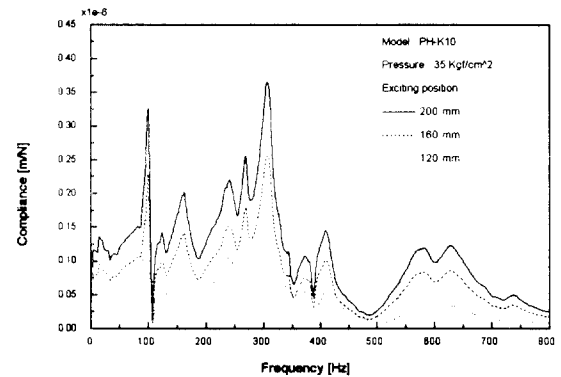
이에 따라 가진시험에 의한 척킹시스템의 동적 컴플라이언스는 척킹압력에 따라 Fig. 8과 같으며, 여기서 측정된 시스템의 고유진동수는 척킹압력, 가진점 길이 등 척킹조건에 관계없이 동일한 형태를 보이면서 300 Hz 성분에서 진동의 크기가 최대로 나타났고, 이를 요약 정리하면 Fig. 9와 같다. 즉 척킹시스템의 불안정성을 의미하는 동적 컴플라이언스의 크기는 척의 선단에서 부터 가진점의 길이(L)에 따라 증가하면서 파악력의 증가에 따라 감소하는 경향을 갖고 있다.

Table 2. Specification of exciting test

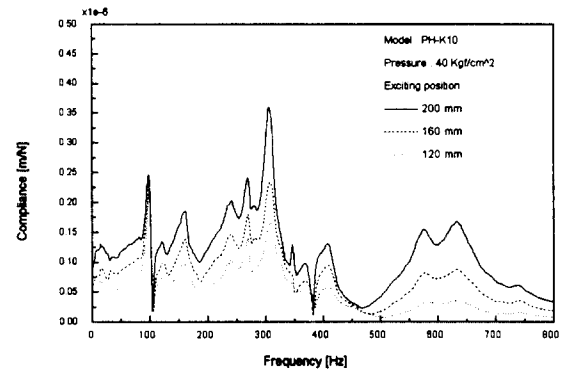
가공기계		보통선반(스텝580)
Chuck규격		10" (3-Jaw)
공작물	형식	환봉
	길이(mm)	200
	직경(mm)	109
	재질	SM45C
파악조건	파악력(유압), kg/cm ²	30, 35, 40
	파악길이(mm)	50
가진점 길이(mm), L		120, 160, 200



a) chucking pressure 30kg/cm²



b) chucking pressure 35kg/cm²



c) chucking pressure 40kg/cm²

Fig. 8 Test results of dynamic compliance due to length of exciting position

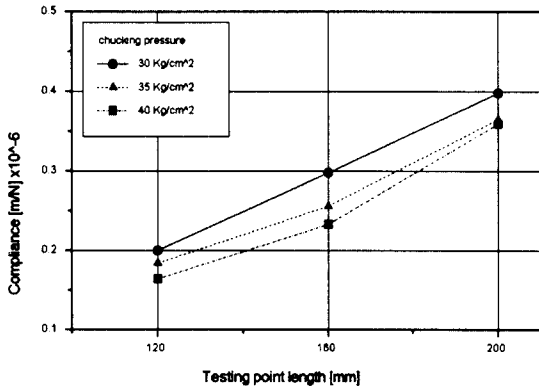


Fig. 9 Compliance due to chucking force and length of exciting postion

3.2 가공시스템의 안정한계

척킹시스템에 있어서 공구-공작물 사이에서 야기되는 동적 불안정성은 주로 채터(Chatter) 발생에 관한 사항으로서 Fig. 10과 같이 상대 컴플라이언스를 측정함에 의해 평가할 수 있다.⁽⁷⁾

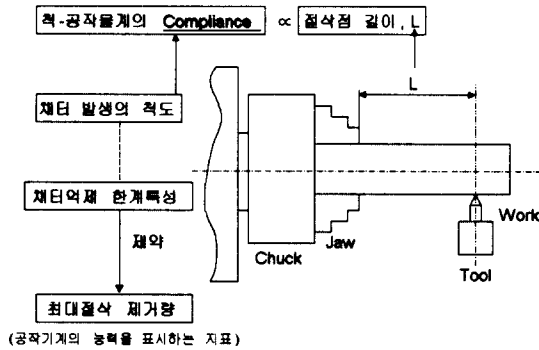


Fig. 10 Testing of instability in cutting process

즉 가공시스템에서 채터를 일으키지 않으면서 가공할 수 있는 최대 절삭속(b_{lim})은 식(2)와 같이 동적 비절삭력 계수(k_s)와 함께 특정 방향 컴플라이언스($G_m(j\omega)$)의 음(陰)의 실수부 크기에 반비례한다.⁽⁸⁾

$$b_{lim} = \frac{-1}{2k_s \text{Re}(G_m(j\omega))_{neg}} \quad (2)$$

이에 따라 본 연구에서는 공구-공작물 사이의 상대 컴플라이언스를 공작물이 정지 및 회전할 경우로 나누어 측정하였으며, 여기에는 <Fig. 11과 같이 1 kHz이내에서 100 N의 힘으로 비접촉 가진할 수 있도록 제작된 마그네틱 가진기와 비접촉 변위센서를 사용하였다.

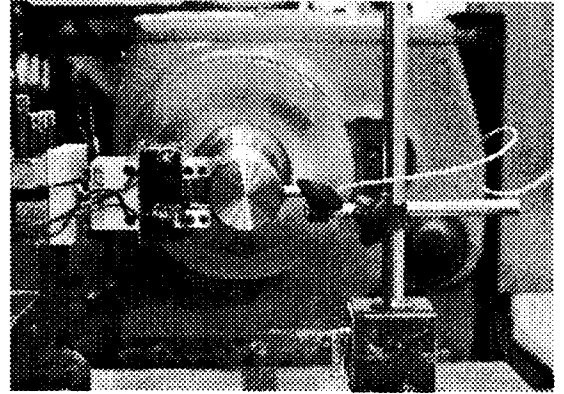
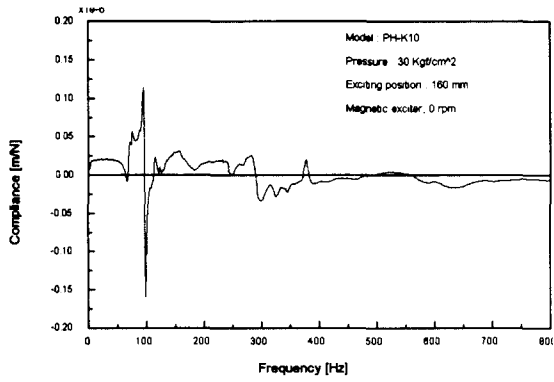
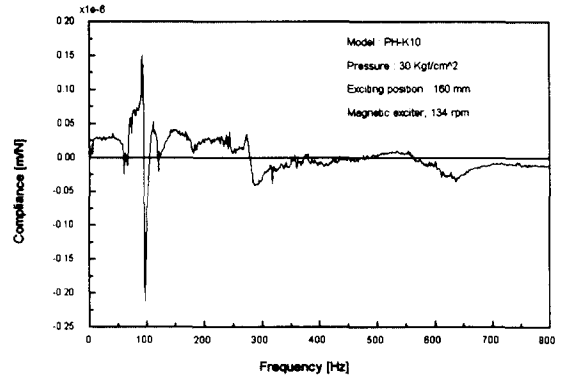


Fig. 11 Measuring dynamic compliance of rotating spindle using a magnetic exciter

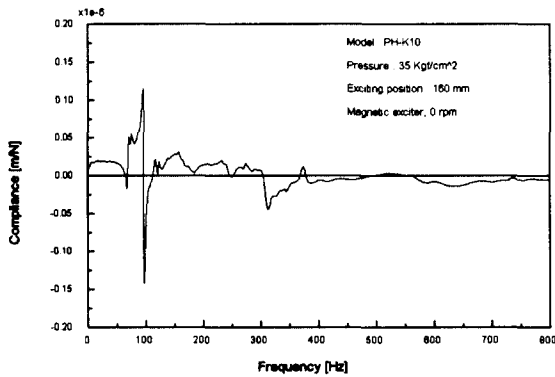
따라서 Fig. 12와 Fig. 13은 척킹압력에 따른 상대 컴플라이언스의 실수부에 대한 측정 결과이며, 이를 관찰할 때 척킹압력이 증가함에 따라 고유진동수는 동일하나 음(陰)의 실수부 크기만이 줄어들어 그만큼 가공계의 안정영역은 증대되고 있고, 이중에 주축계가 정지시 보다는 회전할 경우가 안정영역이 작아지는 경향을 볼 수 있다. 특히 여기서 지배적인 고유진동수는 약 88 Hz로서 이는 Fig. 8과 비교시 1차 고유진동수에 해당되는 것으로서 척 자체만의 특성이 아니라 공구대-척-주축-기계구조물이 연결되어 일련의 폐회로가 구성된 총체적 시스템의 고유진동수이기 때문에 Fig. 8의 가장 큰 300 Hz의 진동성분 보다도 1차 고유진동 특성만이 나타난 것이다.



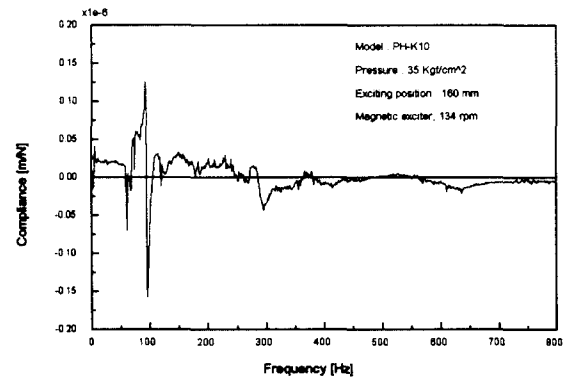
a) chucking pressure 30 kg/cm²



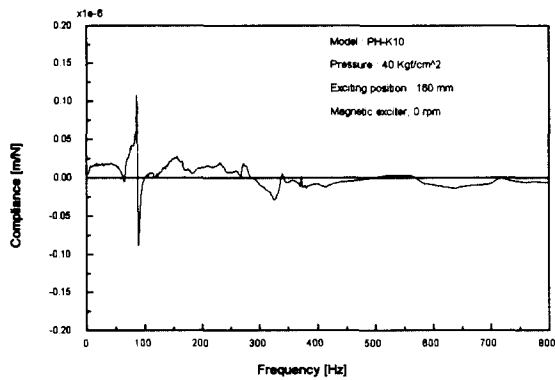
a) chucking pressure 30 kg/cm²



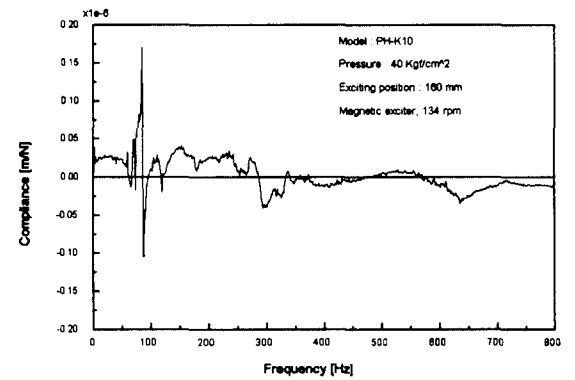
b) chucking pressure 35 kg/cm²



b) chucking pressure 35 kg/cm²



c) chucking pressure 40 kg/cm²



c) chucking pressure 40 kg/cm²

Fig. 12 Real receptances, $Re(G_m(j\omega))$ of cutting system, (rotating speed 0 rpm, exciting position 160mm)

Fig. 13 Real receptances, $Re(G_m(j\omega))$ of cutting system, (rotating speed 134 rpm, exciting position 160mm)

한편, 상기에서 측정된 가공시스템의 안정성을 절삭시험을 통해 확인하기 위하여 Fig. 14 및 Fig. 15와 같이 실험장치를 구성하였으며, 이에 따라 가공시의 절삭력은 공구동력계에서 측정하고 동시에 변동절삭력에 의한 응답신호는 비접촉 변위센서로 측정하여 이들 신호를 FFT처리를 통한 상대 컴플라이언스를 측정하였다. 여기서 상대 컴플라이언스는 주로 Chatter진동에 의한 것으로서 이의 발생에 따른 척킹시스템의 동적 불안정성 상태를 평가하는데 주안점을 두었다.

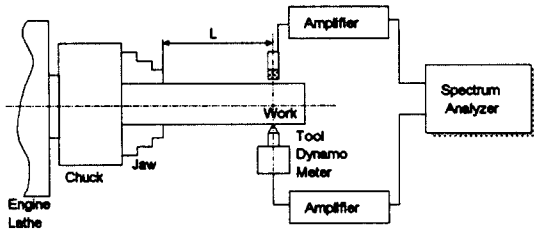


Fig. 14 Schematic diagram of experimental set-up for cutting test

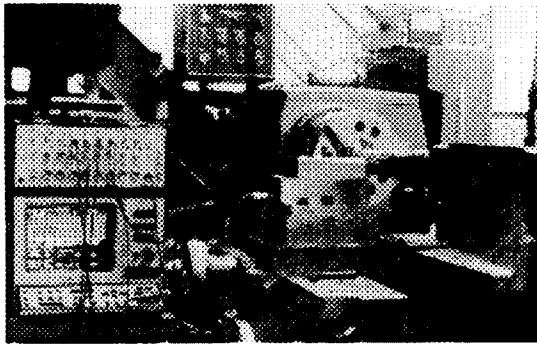


Fig. 15 Experimental set-up for cutting test

즉 Fig. 14에서와 같이 척킹된 원통형 공작물을 절삭깊이 2.0 mm, 공구 이송속도 0.37 mm/rev, 공작물 회전속도 134 rpm의 가공조건으로 가공거리(L)에 따라 가공을 수행하면서 동적 불안정성이 야기되는 상태를 관찰하였으며, 이에 대한 측정결과가 Fig. 16에서 보

여준다.

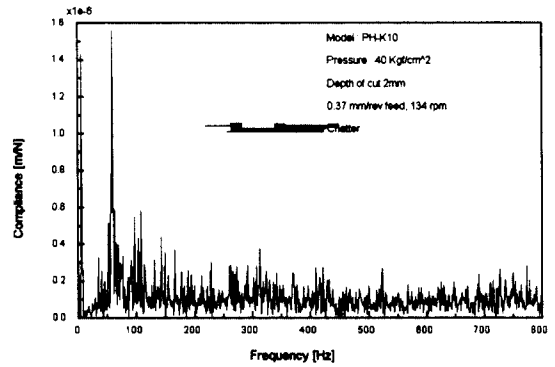


Fig. 16 Results of cutting test

여기서 볼 때 채터현상이 발생하는 주파수는 Fig. 13에서 측정된 상대 컴플라이언스 발생 주파수와 거의 일치되는 약 80 Hz 부근에서 나타나고 있고, 이는 공작물 척킹상태에 따른 가진시험에서 지배적 고유진동수로 측정된 300Hz보다는 낮은 영역에서 발생되고 있음을 볼 수 있다. 따라서 상기의 결과를 토대로 볼 때 가공과정에서의 동적 불안정성인 채터발생은 가진시험에서 나타난 1차고유진동 특성과 관계있으며, 여기서의 상대 컴플라이언스는 가공조건 및 공작물의 척킹상태와 상호 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

4. 결과 및 고찰

공작기계의 척킹시스템에서 안정성에 영향을 주는 인자는 조의 파악력과 공작물의 가공 위치이다. 이에 대한 연구를 위해 우선 척의 동적파악력과 몸체구조물의 변형해석을 수행하여 척킹구조에 있어서의 파악특성을 검토하였으며, 이어서 척킹시스템의 동특성을 측정하여 가공의 안정한계를 예측하고 절삭시험을 통한 가공시스템의 동적 불안정성을 평가하였다. 따라서 본 연구모델은 정상속도에 도달하는 동

안 원심력이 작용되어 변형하는 환경에서도 동적파악력이 초기파악력의 1/3 이상 수준으로 유지됨을 확인하였고, 공작물 척킹구조에서의 동적 불안정성은 공작물의 길이에 따라 증가하면서 파악력의 증가에 따라 감소하는 경향을 확인하였다. 이 경우 고유진동수는 척킹조건에 관계없이 동일한 형태를 가지면서 1차 고유진동수는 88 Hz이나 진동의 크기가 300 Hz에서 지배적으로 나타났다. 특히 가공시스템과 같이 공구와 공작물이 상호 접촉 유지되는 상황을 재현한 마그네틱 가진시험에서는 상대 컴플라이언스인 음(陰)의 실수부 크기가 파악력이 증대함에 따라 감소하면서 주축이 정지시보다는 운전중일 때 증대하는 경향을 나타냈고, 아울러 1차 고유진동수는 88 Hz로서 다른 고유진동수의 성분보다도 진동의 크기가 최대였으며, 이에의해 역학적 폐회로를 구성하고 있는 본 가공시스템의 절삭구역 고유진동수는 88 Hz임을 알았다. 그러므로 절삭시험결과 가진시험에서 측정된 상대 컴플라이언스의 1차 고유진동수와 근접된 주파수 성분에서 채터현상이 발생하였으며, 이는 가진시험에서의 1차 고유진동수와 절삭과정에서의 채터주파수와는 상호 밀접한 관계가 있음을 고찰해볼 수 있다.

5. 결 론

공작기계용 척킹시스템에 대하여 안정성에 관한 연구를 수행한 결과 아래의 결론을 얻었다.

1. 척시스템은 회전중에 원심력 영향으로 몸체 구조물의 변형과 함께 파악력이 감소하나 초기파악력의 1/3이상은 유지되어야 한다.
2. 공작물이 척킹된 상태에서의 척구조물에 대한 가진시험은 파악력이 작을수록, 척선단부에서의 거리가 멀어질수록 컴플라이언스의 크기는

증대하나 고유진동수는 같은 영역을 유지한다.

3. 공구-공작물이 상호 접촉 유지되는 가공시스템 상황에서의 가진시험은 파악력이 증대함에 따라 전달함수 음(陰)의 실수부 크기는 감소하면서 안정역은 증대 된다.
4. 가진시험에서의 1차 고유진동수와 채터 주파수와는 밀접한 관계가 있고, 채터발생시에는 절삭조건이 달라도 동일한 주파수를 가지면서 절삭면적의 증가에 따라 컴플라이언스의 크기는 증대된다.
5. 따라서 상기의 결과를 토대로 척-공작물계의 동특성은 파악력, 공작물의 가공길이 등의 파악조건과 절삭조건에 밀접한 관계가 있으며 이들은 동적안정성에 영향을 주는 인자이다.

참 고 문 헌

1. 박종권, "공작기계용 정밀 Power Chuck 개발에 관한 연구", 통상산업부 연구보고서, BSM069-536M, 1998
2. R. H. Thornley, B. Wilson, "A Review of some of the Principles Involved in Chuck Design", The Production Engineer, Vol. 51, No. 3, pp. 87-97, 1972
3. S. Ema, E. Marui, "Chucking Performance of a Wedge-type Power Chuck", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, pp. 70-77, 1994
4. H. Shinno, T. Sohara, Y. Ito, "切削中のチャック 把握力の 輕視變化", 日本機械學會論文集(C편), Vol. 55, No. 509, 1989
5. S. S. Rao, "The Finite Element Method in Engineering", Pergamon, 1982
6. J. Tlusty, "Experimental and Computational Identification of Dynamic Structural Models", Annals of CIRP, Vol. 25, No. 2, 1976
7. 박종권, 이후상, "드릴링M/C의 Chatter 해석과 동적안정성에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 6, No. 2, 1989