論文 한국공작기계학회지 제8권 제5호 1999. 10.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

선반용 급속 교환 파워 척의 구조해석 및 성능평가

김문기*, 유중학*, 윤영한*, 국정한*, 박종권**

Structural Analysis and Performance Evaluation of Quick Change Power Chuck for Lathe Operations

Moon-Ki Kim*, Joong-Hak Yoo*, Young-Han Youn*, Jeong-Han Kook*, Jong-Kweon Park**

Abstract

Chucking for workpieces is very important for productivity and efficiency in lathe operations. In point of productivity, top jaws of the chuck should be changed as quickly as possible in order to reduce idle times whenever workpieces are regripped. A quick change power chuck which can change top jaws quickly by using a jaw change handle without any assembly/disassembly processes of screws is analyzed for this study. Strength and stiffness of top jaws by centrifugal force are considered for the design. Structural analysis for the chuck is executed, and the finite element method is introduced using MSC/NASTRAN software. Also, the performance of the chuck is evaluted by experiments.

Key Words : Chucking force(파악력), Power chuck(파워척), Productivity(생산성), Centrifugal force(원심력), Finite element analysis(유한요소해석), Compliance(컴플라이언스), Modeling(모델링), Modal test(가진시험)

1. 서 론

기계가공 중 선삭가공은 대량생산을 하는 경우에 주로 이용되고 있으며, 특히 자동차용 기어 블랭크(gear blank), 축류(shaft), 디스크류 등의 가공에 이용된다. 이 밖에도 자동차 실링(sealing)용 고무금형 등의 다품종 소량 또는 다품종 중량생산의 경우에도 선삭가공이 필요하다. 가공성능은 공작기계의 구조성능 및 공구의 개별적인 요소에 의해 영향을 받지만 가장 큰 영향을 미치는 요인은 공작기계-공작물-공구로 연결되는 일련의 폐루프(closed loop) 시스템이다.[1] 선삭가공에서의 척(chuck)은 전체 시스템을 연결해주는 역할을 할뿐만 아니라 가공물과 직접적인 접촉을 하기 때문에 가공물의 품질 및 정밀도에 직접적인 영향을 미친다.

그래서 기계가공시 생산 자동화나 제품의 정밀도 향상 및 생산성을 높이기 위하여 다양한 형태와 다기능을 가진 각종 척이 개발되고 있다. 특히, 고속회전에 따른 척의 파악력(chucking force) 감소와 강성(stiffness) 저하 문제를

* 한국기술교육대학교
** 한국기계연구원

해결하기 위한 척킹 메카니즘(chucking mechanism)의 개발과 마스터 죠(master jaw)와 탑 죠(top jaw) 등을 설계하고, 무인 가공 시스템에 이용될 수 있는 Adjustable Jaw Change(AJC) 척과 Quick Jaw Change(QJC) 척의 개발에 관한 연구가 행하여지고 있다.[1-3]

최근의 생산 시스템이 생산 합리화나 생산성 향상에 그 목표를 두고 있으므로, 생산시간을 줄이기 위한 요구는 점차 커지고 있는 실정이다. 그래서 비가공시간을 가능한 줄여 가공공정의 효과를 꾀할 수 있는 척이 필요하게 되었고, 이를 위해서는 죠의 개폐 동작이 신속하게 이루어지거나 척을 경량화시킴으로써 관성을 최소화시켜야 한다.

그러므로, 본 연구에서는 공작물의 크기에 따라 탑 죠를 교환해야 할 경우에 여러 나사들 대신에 죠 교환 핸들을 한번 회전시킴으로써 빠른 시간내에 죠의 교환이 가능하여 궁극적으로는 생산성을 향상시킬 수 있는 다품종 소량생산 체제에 적합한 급속 교환(quick change) 파워 척을 해석하고 평가하는 데에 그 목적을 두었다. 이를 위해 원심력에 의한 탑 죠의 강도(strength) 및 강성(stiffness), 그리고 척 본체의 강도 등에 대해 신중히 고려하였다. 척의 구조해석을 위해 유한요소법을 도입하였고, 3차원 FEM 해석은 MSC/NASTRAN 프로그램이 이용되었다. 또한, 척 본체, 마스터 죠 및 탑 죠에 대한 모델링 과정을 거쳐 각 죠에 걸리는 힘에 대한 변형 및 응력 분포를 조사하였고, 척 본체가 회전하면서 발생하는 원심력의 영향과 베어링의 성능을 고려하여 척에 대한 한계 회전수를 설정하였으며. 실험을 통하여 기능검사, 파악력 그리고 정밀도검사 등 척의 성능을 평가하였다.

2. 급속 교환 파워 척의 구조해석

본 연구의 척은 탑 죠를 분해 또는 조립시에 나사가 아닌 급속 교환 전용의 육각형 핸들을 이용함으로써 빠른 시간에 분해 및 조립이 가능한 구조로 되어 있다. 교환의 편의성은 탑 죠 1개당 교환이 약 5초 이내로 가능한, 생산성 향상을 목적으로 하는 척이다. 120간격으로 3개의 탑 죠가 마스터 죠 상에 돌출된 요철 모양의 사이에 끼어서 잠기도록 하여 부착되는데 마스터 죠는 척 본체에 슬라이딩 형태로 붙어 있다. 그리고, 탑 죠의 크기는 척 본체에 비해서 상대적으로 크며, 체결하는 방법이 볼트식의 고정이 아닌 면적 접촉식으로 마스터 죠와 붙어 있다. 주요 제원은 크기가 10″, 정적 파악력이 11,400 kgf, 한계회전수는 4,000 rpm 그리고 죠의 행정(stroke)은 8.8㎜ 이다.

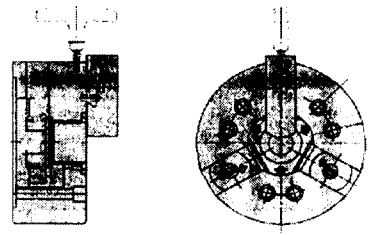

Fig. 1 Schematic diagram of quick change power chuck

Fig. 1은 급속 교환 파워 척의 개략도를 보여주고 있다.

본 연구에서는 원심력에 의한 탑 죠의 강도 및 강성의 측면을 고려하여 검토하였다. 또한 척 본체는 그 크기가 상당하여 원심력에 의한 강도 계산이 필요하므로 척의 회전속도를 변화시켜 가면서 구조해석을 실시하였고, 죠에 파악력이 작용할 때의 변형과 응력상태를 조사하였다.

2.1 척 본체 및 죠에 대한 모델링

척 본체는 유한요소법을 이용하여 구조해석을 실시하였는데[4], 8 절점 입방체 요소를 사용한 3차원 FEM해석은 MSC의 NASTRAN 프로그램을 이용하여 구성하였다. 3차원 솔리드 모델링은 요소당 단위길이를 약 5㎜ 간격으로 하여 절점(node)의 수가 4192개이고, 요소(element)의 수가 3180개로 정밀하게 모델링 하였다. 해석을 위한 경계조건은 xy 평면으로부터 30° 와 120° 의 위치에 존재하는 2개의 대칭면을 사용하여 주어졌다. 즉, 대칭면에 수직한 방향(tangential direction)으로는 변위는 없는 고정의 조건이고 대칭면상(radial direction)으로만 변위가 허용되는 경계조건이다. Fig. 2는 퀵 체지 척의 본체에 대한 1/3 단면 모델링을 나타낸다.

또한 마스터 죠와 소프트 죠는 실제로는 돌출된 요철부위만 두 솔리드가 고정되어 있고 죠끼리 만나는 두 평면이 슬라이딩 하는 조건이나, 해석에서는 두 평면을 0.2㎜ 간격을 둔 상태로 모델링하였다. 그리고 마스터 죠는 고정

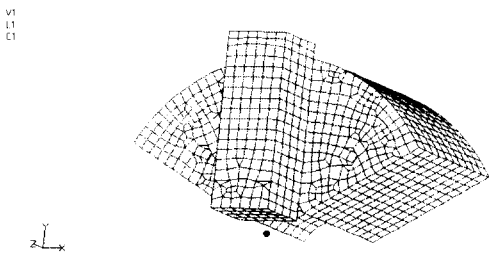

Fig. 2 Quick change power chuck solid model

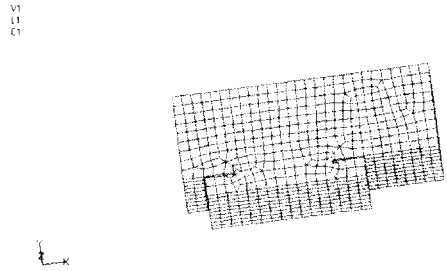

Fig. 3 Modeling for master jaw and top jaw

되어 있는 경계조건을 선정하였다. Fig. 3은 마스터 죠와 탑 죠의 모델링을 보여준다.

2.2 죠에 대한 구조 해석

마스터 죠와 소프트 죠에 걸리는 총 힘의 크기는 정적 파악력의 크기인 11,400 kgf의 하중을 3개의 죠가 담당하여야 하므로, 1/3을 모델링한 유한요소법의 본 해석에서는 1개의 죠에 걸린 힘의 크기를 계산하여 작용되도록 하중조건을 정하였다. 즉, 1개의 죠에 걸린 힘의 크기는 3,800 kgf이다. 이 크기의 힘이 z 방향으로 작용할 때의 응력 및 변위 분포는 Fig. 4와 Fig. 5에서 보여준다.

최대의 응력은 척 본체의 중심축에서 가까운 지점인 마스터 죠와 소프트 죠가 접촉하고 있는 위치에서 발생하는

Fig. 4 Stress distribution applied to the jaw system

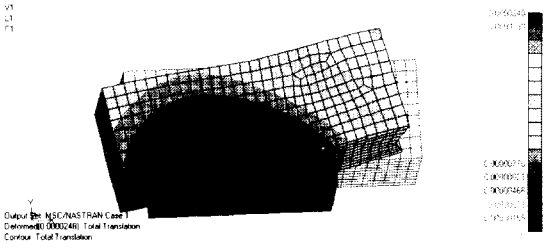

Fig. 5 Displacement distribution for jaw system

데 그 크기는 재료의 압축 항복응력인 165 MPa에 거의 도달하는 응력상태를 보여주고 있다. 이러한 항복허용응력의 수준에 도달되는 큰 응력은 장시간 사용하는 죠의 경우 상당한 문제가 되므로 안전계수를 고려할 때 작용응력의 크기는 허용 항복응력의 약 50%의 수준 이하로 낮출 필요가 있다.

그러기 위해서는 두 가지의 방법이 있을 수 있는데 그 중 가장 손쉬운 방법은 치수를 크게 하는 방법이나 이는 기하학적인 문제와 원심력이 더 크게 작용하는 다른 문제가 있어 죠에 대한 강도를 높이기 위해서는 열처리 등의 방법으로 경화시키는 것이 바람직하다. 특히 마스터 죠와 소프트 죠가 접촉하여 체결되는 돌출 및 함몰 부위에 대한 응력 집중이 발생되지 않도록 이곳에 라운딩을 크게 주고 고주파를 이용한 열처리가 따라야 한다.

2.3 척 본체에 대한 구조 해석

척이 회전하면서 발생하는 원심력의 영향과 베어링의 성능을 고려하여 한계 회전수는 4,000 rpm으로 설계기준을 설정하였다. 본 FEM에 의한 해석은 척 본체가 회전함으로써 발생하는 원심력의 영향을 해석하고자 한다. 해석에서는 <표 1>의 해석 결과와 같이 회전수를 변화시켜 가면서 수행하였다. 표에서 보는바와 같이 하중과 변위 모두 충분한 여유를 가지는 범위내에 존재함을 알 수 있다. 즉, 10″ 급속교환 파워 척의 치수는 한계 회전수인 4,000 rpm의 범위에서는 충분한 안전계수를 갖는다고 평가된다. 이에 대한 척의 변형 및 응력 분포는 Fig. 6과 Fig. 7에서 보여준다.

Table 1 Summary of analysis results

회전수{rpm} / 해석결과	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	10,000
최대응력(MPa)	2.31	9.25	20.9	37.0	57.8	182.2
최대변위(m)	0.89	3.57	8.04	14.3	22.3	49

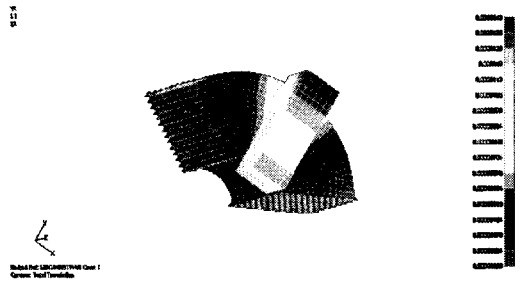

Fig. 6 Strain distribution of chuck for 4,000 rpm

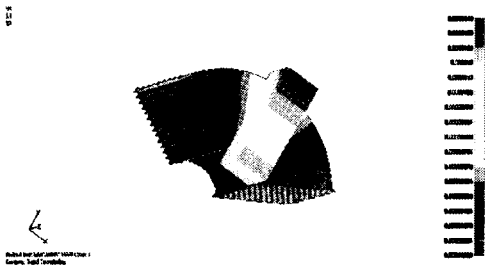

Fig. 7 Stress distribution of chuck for 4,000 rpm

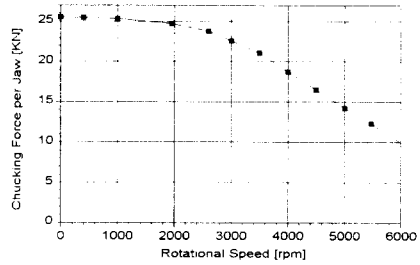

Fig. 7 Chucking force due to rotational speed

3. 척의 성능평가

3.1 동적 파악력

척의 회전속도가 증가함에 따라 원심력의 증대로 파악력이 감소되면서 공작물의 흔들림과 함께 정밀도가 저하되므로 파악력 저하방지 방안과 척의 내부응력에 대한 감소방안 등이 고려되어져야 하는데[5], 일반적으로 회전 중에 죠에서 발생하는 계산상의 원심력 합계는 척의 최대 파악력의 2/3를 초과하지 않아야 하며, 회전중에 발생되는 파악력은 식(1)에서와 같이 죠의 질량, 회전반경, 공작물의 형상, 척킹 시스템의 강성 등 여러 인자에 의해 감소하는 비율이 다르다.[6-7]

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

여기서 F는 동적파악력, F_0는 초기파악력, m_0는 죠의질량, r_0는 죠의 회전반경 그리고 ω는 각속도를 나타낸다. 이러한 파악력의 상태는 Fig. 8에서와 같이 스트레인 게이지형의 파악력 측정게이지를 이용하여 측정되었고, 그 결과는 Fig. 9에서 보여준다.

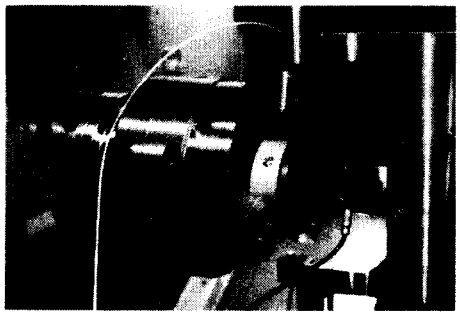

Fig. 8 Experimental set-up of chucking force-displaceme measurement

3.2 척-공작물계의 동적시험

절삭가공 중 공구와 공작물사이의 상대진동은 가공능률을 저하시키는데, 여기에는 기계본체의 강성뿐만 아니라 공구와 공작물을 지지해주는 척과 같은 요소부의 접점 강성이 중요한 요소로 작용을 한다.[8] 따라서 본 연구에서는 공구와 공작물사이에 야기되는 상대진동에 의한 동적 불안정성을 평가하여 척의 성능을 예측해보고자 하며, 이를 위해 척킹시스템에 가진시험을 통한 컴플라이언스(compliance)를 측정하고 절삭시험을 실시하여 척과 공작물계의 특성을 평가하였다.

3.2.1 척킹시스템의 가진시험

가진시험에 의한 척-공작물계의 동적 컴플라이언스 측정은 Fig. 10의 실험방법과 같이 충격햄머에 의한 전달함수를 측정하는 방법으로 실시하였으며, 척킹시스템에 영향을 주는 인자로서 파악력과 파악위치를 고려하여 실시하였다. 즉, 척 선단 위치로부터 가진점까지의 거리(L)를 증대시키면서 유압에 의한 파악력을 여러 종류로 설정하여 척킹시스템의 컴플라이언스를 측정하였다. 이때의 실험조건은 <표 2>와 같고, 가진방향은 각각의 측정점에 대하여 공작물의 반경방향으로 가진력을 주어 절삭조건에

Table 2 Specification of exciting test

가 공 기 계		보통선반(스윙580)
Chuck 규격		0″(3-Jaw)
공작물	형 식	환 봉
	길이(mm)	200
	직경(mm)	109
	재 질	SM45C
파악조건	파악력(유압), kg/㎠	30, 35, 40
	파악길이(mm)	50
가진점 길이(mm), L		120, 160, 200

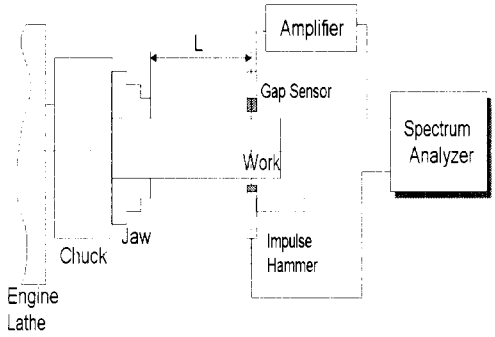

Fig. 10 Exciting test of chucking system

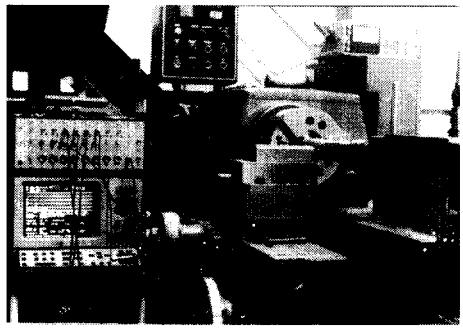

Fig. 12 Experimental set-up for cutting test

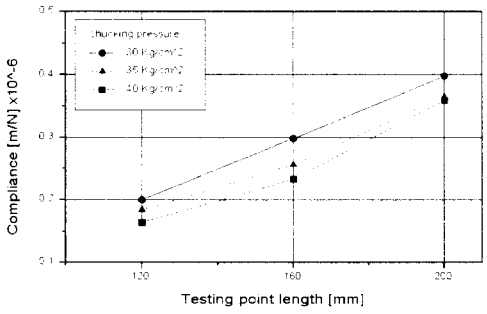

Fig. 11 Compliance due to chucking force and length of exciting position

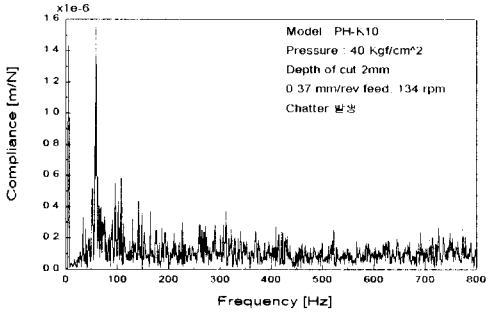

Fig. 13 Results of cutting test

서의 배분력방향과 동일한 조건이 되도록 하였으며, 동시에 응답신호를 비접촉센서로 측정하여 가진력과 응답신호사이의 전달함수를 FFT 분석기에 의해 해석함으로써 척킹시스템의 동적 컴플라이언스를 계산하였다. 그 결과, Fig. 11에서와 같이 척의 선단에서부터 공작물의 길이에 따라 증가하고 있으며 또한 파악력이 증대함에따라 감소하는 경향을 볼 수 있다.

3.2.2 척킹시스템의 절삭시험

척킹시스템에서의 절삭시험은 Fig. 12와 같이 실험장치를 구성하여 그 특성을 평가하였으며, 이 경우 가공시의 절삭력은 공구동력계에서 측정하고 동시에 변동절삭력에 의한 응답신호를 비접촉센서로 측정하여 이들 신호를 가지고 FFT 분석을 통한 상대 컴플라이언스를 측정하였다. 여기서의 상대 컴플라이언스는 주로 채터(chatter)진동으로서, 이에 따른 척킹시스템의 동적 불안정성 상태를 평가하는데 주안점을 두었다.[9] 즉, 척킹된 원통형 공작물을 일정한 절삭조건으로 가공거리에 따라 가공을 수행하면서 동적불안정이 야기되는 상태를 관찰하면서 측정하였으며, 이에 대한 측정결과는 Fig. 13에서 보여준다. 이 그림에서 알 수 있듯이 약 88Hz에서 불안정성이 발생되는데, 이는 가진시험에서 나타난 1차 고유진동수인 약 330Hz보다 낮은 영역이다. 따라서 척-공작물 시스템의 진동발생 주파수와 컴플라이언스는 가공조건 및 파악조건 등과 관계가 있고, 특히 가공과정에서의 동적 불안정성인 채터 발생은 가진시험에서 나타난 1차 고유진동 특성과 관계가 있으며[10], 여기서의 컴플라이언스는 절삭조건과 상관관계가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

선반작업시 신속하게 척의 죠를 교환할 수 있는 다품종 소량생산 체제에 적합한 급속 교환 파워 척의 구조해석 및 척의 성능 평가를 위한 파악력 측정, 가진시험 그리고 절삭시험 등의 실험 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

(1) 원심력에 의한 척 본체의 응력과 변형은 작으나, 소프트 죠의 크기가 상당히 커서 결과적으로 는 마스터 죠와 붙어 있는 척의 본체 부근에 응력집중 현상이 발생하므로 소프트 죠의 중량 을 줄일 수 있는 방안을 강구함이 바람직하다.

(2) 파악력에 의해서 발생하는 최대의 압축응력은 마스터 죠와 소프트 죠가 접촉하고 있는 위치에서 발생하는데 그 크기는 재료의 압축 항복응력인 165 MPa에 거의 도달하는 값으로 장시간 사용하는 죠의 경우 문제가 되므로 안전계수를 고려할 때 작용응력의 크기는 허용 항복응력의 50%의 수준 이하로 낮출 필요가 있다. 그러므로, 죠에 대한 강도를 높이기 위해서는 고강도 재질로 변경 하거나 특수열처리 등의 방법이 바람직하다. 그리고 마스터 죠와 소프트 죠가 접촉하여 체결되는 돌출 및 함몰 부위에 응력집중 현상이 발생하는데 이를 방지하기 위해서는 이곳에 라운딩을 크게 주고 고주파를 이용한 열처리가 요구된다.

(3) 척의 동적파악력을 측정해 본 결과, 회전속도의 증가에 따라 약 2,000rpm 이후부터는 파악력이 급격히 감소하는 경향을 보이나, 정상속도(6,000rpm)에 도달되어서는 초기 파악력의 1/3이상 수준으로 잔존하는 특성을 가지므로 양호함을 알 수 있다.

(4) 절삭시 강성측면에서 취약하게되는 척-공작물 시스템에 대한 컴플라이언스를 측정하여 동적으로 야기되는 특성을 규명하였다. 이를 위해 가진시험과 절삭시험을 병행하여 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 가진시험에서 1차 고유진동수와 채터주파수와는 밀접한 관계가 있다.
- 공작물의 파악력이 작을수록, 또는 척 선단부로부터 거리가 멀어질수록 컴플라이언스의 크기는 증대된다.
- 채터 발생시에는 절삭조건이 다를지라도 동일한 채터 주파수를 가지며 이 경우 절삭면적이 증가할수록 컴플라이언스의 크기는 증대된다.
- 결론적으로 척-공작물계의 동특성은 공작물의 파악조건과 절삭조건에 밀접한 관계가 있으며, 특히 컴플라이언스의 크기는 절삭조건과 상관관계가 있음을 알 수 있다.

(5) 신속한 죠 교환 기술과 마스타 죠 및 탑 죠의 경량화 설계 기술 등을 토대로 공작기계용 척 설계 기술을 향상시킬 수 있고, 시제품을 제작하여 성능 평가 및 보완 단계를 거쳐 상품화할 수 있는 연구 및 최적 모델 확립이 앞으로의 과제이다.

참 고 문 헌

(1) 박종권 외 4인, "공작기계용 정밀 Power Chuck 개발에 관한 연구", 통상산업부 연구보고서, BSM069-536M, 1998.

(2) 성활경 외 2인, "고속유압용 척개발", 창원대학교 산업기술연구소 논문집, 제9편, pp.229~245, 1995.

(3) 한국기계연구원, "Auto-Index Chuck의 설계 및 제조기술연구", 상공부 공기반 과제 연구보고서, 1990.

(4) S. S. Rao, "The Finite Element Method in Engineering", Pergamon, 1982.

(5) T. W. Park, M. Tsutsumi, I. Tokasiki, "3-죠오 척의 動的 把握力에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 8, No. 4, 1991.

(6) S. Ema, E. Marui, "Chucking Performance of a Wedge-type Power Chuck", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, pp.70~77, 1994.

(7) 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, N0. 509, 1989.

(8) J. Tlusty, "Experimental and Computational Identification of Dynamic Structural Models", Annals of CIRP, Vol. 25, No. 2, 1976.

(9) 박종권, 이후상, "드릴링 M/C의 Chatter 해석과 동적안정성에 관한 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 6, No. 2, 1989.

(10) 조정준 외 2인, "선반용 고속 주축계의 동특성 해석", 한국정밀공학회지, 제11권, 제4호, 1994.

(11) M. Rahman, "Effect of Clamping Conditions on Chatter Stability and Machining Accuracy", Annals of the C.I.R.P., Vol.34, pp. 339-342, 1985.