

CNC선반에서 주축변위센서를 이용한 가공편심오차의 검출에 관한 연구

A Study on Detection of Runout Eccentric Error Using CCS Sensor at CNC Lathe

양재생*, 맹희영 / 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

Abstract

This paper presents the methodology for measuring eccentricity of the cylindrically machined part using CCS(Cylindrical Capacity Spindle Sensor) signal in the CNC turning process. In order to investigate the relationships between CCS orbits and eccentricities, the initial conditions for various eccentricity state and machining process is applied to the experimental strategy. AS a result, it is considered the linearities of CCS signal and magnitude of eccentricity of machined cylindrical surfaces based on the possibility as a automatic detection apparatus for the CNC lathe.

1. 서론

최근 가공시스템의 자체 측정 및 진단·보정 기능에 대한 요구가 높아지고 있다.

CNC선반에서 가공되는 환봉 가공물들의 품질은 진원도(Circularity), 원통도(Cylindricity), 표면거칠기(Surface roughness) 등에 의해 결정되며, 이 중 원통도는 가공시 이송방향에 따른 편심가공오차의 발생특성에 의해 가장 큰 영향을 받는다.

기하학적으로 선삭가공 후의 편심가공오차는 공구-공작물계의 상대적인 변위에 의해 발생되고, 이는 절삭력 변화 특성과 밀접한 상관관계를 갖는다.

지금까지 선삭가공에서의 편심가공오차를 규명하고자 하는 연구는 주로 회전오차의 측정기구를 통해 오차의 발생원인을 방지하려는 관점에서 이루어 지는 것이 보통이었다.^(1, 2)

그렇지만 이러한 방법은 고정밀도의 부품을 품질 관리하는 데에는 그 한계가 있기 때문에, 최근의 연구 방향은 각종 동적 센서를 통해 오차의 발생원인

을 규명하여 예측하고, 이때 밝혀진 절삭력계의 동특성과 편심가공오차와의 상관관계를 통해 가공 중 능동적으로 절삭조건을 적응제어(Adaptive control) 하여 가공정밀도를 높이려는 방향으로 발전하고 있다.⁽³⁾

그러나, 아직 절삭력계의 동특성은 많은 인자들에 의해 지배되는 복잡한 시스템이기 때문에 이러한 연구를 진전시키기 위해서는 동특성에 관련된 인자들을 복합적으로 잘 검출해 줄 수 있는 센서의 개발이 우선되어야 한다.

이에, CCS(Cylindrical Capacity Spindle Sensor)는 공구대에 설치하는 기존의 동력계에 비해서 높은 측정 정밀도와 안정성을 가지며 센서 설치에 따른 가공 시스템의 특성 변화가 없는 장점이 있다.

CCS를 이용한 상시 모니터링에 대한 연구로는 CCS 신호와 공구마모와의 선형적 관계를 이용하여 선반에서의 주축의 변위 신호를 통해 공구마모를 진단한 바가 있다.^(4, 5)

따라서 본 연구에서는 원통형 정전용량 주축변위 센서의 측정상의 용이한 특성을 이용하여 가공 前 공작물에 주어진 편심량에 따라 절삭력 특성이 어떻게 변화하고 이것이 가공後에 편심가공오차에 어떻게 영향을 주는 가에 대하여 분석하고자 하였다. 이를 위해 여러 물립조건을 고려하여 인위적으로 초기 편심량을 변화시켰으며, 가공 中에는 CCS를 이용하여 초기 편심량의 각 크기에 대한 절삭력의 변화 특성을 검출하였다. 그리고 초기 편심량과 절삭력 변화 특성 사이의 선형적 상관관계를 예측하였으며, 또한 가공 後에는 가공면의 편심가공오차를 측정하여 공구-공작물 절삭력계에 대한 영향성을 평가하였다. 그리고 최종적으로 그 결과를 활용하여 가공前 편심량이 가공 후의 편심가공오차에 미치는 영향을 검토하였고, 이들 결과를 통해 가공공정상 상시모니터링 기능으로의 사용가능성을 검토하였다.

2. CCS 실험장치의 원리 및 구성

2.1 주축변위센서의 원리

전도성이 있는 두 판이 50 μ m 정도의 간극에서 평행하게 놓여있을 때, 여기에 전류가 흐르면 정전용량이 형성되며 그 크기는 전류의 크기, 두 평판의 유효 면적, 사이 매질의 유전율, 간극에 따라 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{x} \quad (1)$$

여기서 ϵ_0 는 매질 사이의 유전율이다.

정전용량형 센서는 면적이나 간극을 측정하고자 하는 물리량에 연동시켜 여기서 변화하는 정전용량의 값을 통해 물리량을 얻어내는 원리이다.

원통형 정전용량 센서는 전체 원주면을 감싸는 구조로 제작되며, 원주면을 따라 8분할되어 마주보는 개개 센서의 값을 차동 증폭하도록 설계되어 주축으로부터 유입되는 노이즈 성분의 동상 성분이 제거되도록 제작된다. 그리고 이는 주축 하우징 커버 부에 부착되어 척 외경과의 틈새에 형성되는 정전용량 값을 통해 주축의 변위를 측정할 수 있다.

본 연구에서 사용한 원통형 정전용량 주축 변위 센서는 원주면 전체를 측정면으로 주축 회전부와 이를 감싸는 센서 면 사이에 형성되는 정전용량의 변화를 통해 변위를 측정하는 센서로써 측정면의 표면조도, 형상 오차 등에 의한 영향이 적으며, 약 50nm 이상의 변위 분해능을 가지도록 제작되었다.

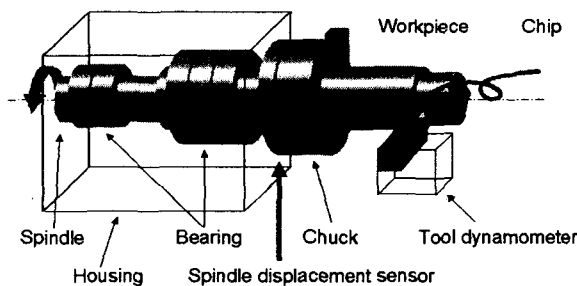


Fig. 1 Configuration of CCS installation on spindle.

2.2 실험장치의 구성

본 실험에서는 주축모터의 소비동력이 7.5kW인

CNC선반을 사용하였으며, 원통형 정전용량형 주축 변위 센서를 척 뒤편에 설치하였고, 이를 이용하여 편심된 가공물의 절삭시 주축 중심궤적의 변화를 측정하였다. 초기 편심량에 따른 절삭력 변화의 상관관계를 파악하기 위하여 공구 동력계를 사용하여 절삭력을 측정하였다. 신호처리를 위해서는 PC를 사용하였으며, DT-3010 AD 보드와 HP-VEE를 사용하여 변위 신호 및 절삭력 신호의 측정 및 후처리를 하는데 사용하였다.

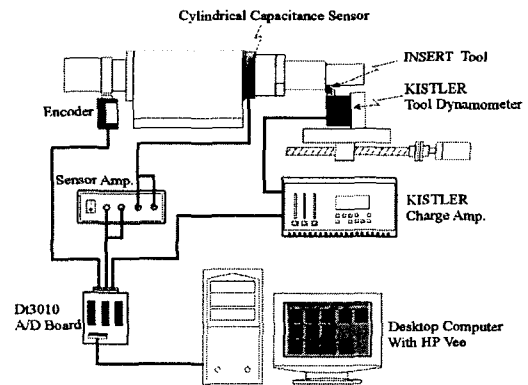


Fig. 2 Diagram of experimental system.

다음의 Fig. 3에서는 이들 시스템에 의해 측정되는 데이터를 각각의 모드에 따라 표현한 결과를 예시한 것으로, CCS신호를 PC에 연계하여 display 될 수 있도록 전용 Software에 의한 결과이다.^(4, 5)

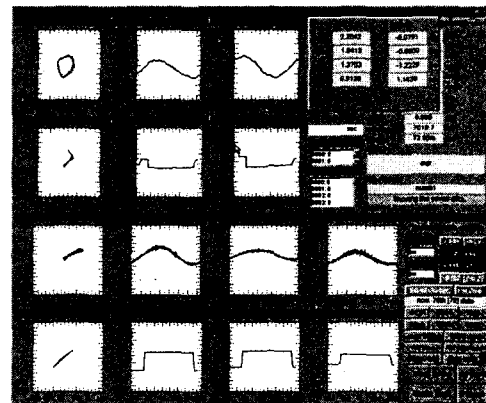


Fig. 3 Example of measured data by CCS.

3. 실험 방법 및 조건

3.1 실험방법

본 연구에서 수행한 실험은 우선 제작된 시편

편(D=φ80mm, L=100mm, SM45C)이 편심되도록 척에 설치하고 초기편심량을 측정하여 준비한 다음, 실험조건별로 시험편의 실험가공(v=200m/min, f=0.1mm/rev)을 실시하는 과정을 거쳤다. 이들 과정에서 측정되는 실험 데이터는 CCS Orbit, CCS x, CCS y 방향의 절삭력 신호로 표현되게 하였으며, 이를 통하여 실험조건별(편심량, CCS x, CCS y, Cutting Force)로 데이터를 분석하는 과정을 거쳤다.

3.2 실험조건

(1) 편심량의 결정

절삭가공시 시험편이 편심되었을 경우, 절삭은 절삭깊이가 최소 및 최대가 되는 상태가 반복된다. 본 실험에서는 절삭 깊이가 최소가 되는 양을 0.1 mm, 0.2 mm의 2가지를 주어 절삭깊이의 가변량을 달리하면서 실험조건을 선정하였다.

여기서 계획된 실험조건은 Table 1에서 보이는 바와 같이, 최소 절삭깊이가 0.1 mm인 경우의 실험은 A로, 절삭깊이가 0.2 mm인 경우는 B로 정하여 비교 실험을 실시하였다.

(2) 측정을 위한 절삭지점의 결정

측정상의 기준이 되는 절삭기준 지점의 선정은 Fig. 4에서 보이는 바와 같이, 절삭위치에 따라 A, B, C로 정하여 측정하여 사용하였다.

Table 1. Experimental condition

Code	No.	Depth of cut		
		Min.(mm)	Max.(mm)	Variation (mm)
A	A-1	0.1	0.5	0.4
	A-2	0.1	0.55	0.45
	A-3	0.1	0.74	0.64
	A-4	0.1	0.92	0.82
	A-5	0.1	1.18	1.08
B	B-1	0.2	0.54	0.34
	B-2	0.2	0.76	0.56
	B-3	0.2	0.84	0.64
	B-4	0.2	1.02	0.82
	B-5	0.2	1.18	0.98

(3) 절삭 속도와 이송량의 선정

편심량은 가공물의 표면 거칠기에 따라서 영향을 받기 때문에, 표면거칠기가 크면 편심량은 표면 상태의 영향으로 신뢰적인 값을 얻을 수 없다. 따라서

본 실험에 사용한 피삭재가 SM45C인 점을 고려하여, 절삭속도가 200 m/min(800~900rpm), 이송량이 0.1 mm/rev인 경우로 실험하였다.

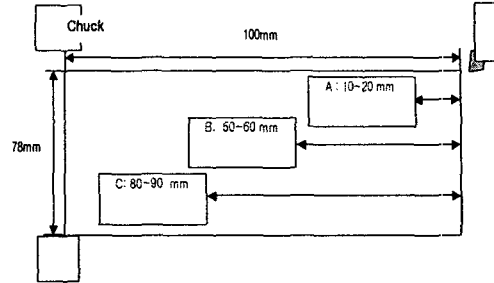


Fig. 4 Measuring position of eccentricity

(4) 절삭 공구의 선정

본 실험에는 PCLNR2525M12의 공구홀더를 사용하였으며, 인서트는 CNMG120408 KT150 (대한중석)의 것을 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

가공물이 공회전하는 경우와 가공중인 경우의 Cutting Position A, B, C에서 주축의 중심궤적인 CCS Orbit, 주축변위 CCS x, CCS y, 절삭력의 3분력 등을 측정하였으며, 가공 후에는 편심량을 측정하여 실험 A와 실험 B를 비교 고찰하였다.

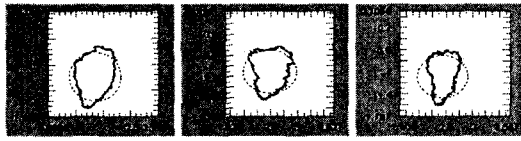
(1) 초기 편심량에 따른 CCS Orbit의 직경 변화비

실험조건에 의하여 가공중에 변화하는 주축의 중심궤적인 CCS Orbit를 측정하였다. 측정된 전체 데이터 중 Cutting Position A에서의 CCS Orbit의 값을 찾아 Fig 5에 나타내었으며, 초기 편심량과 최소 절삭깊이에 따라 그 형상의 변화를 알 수 있다.

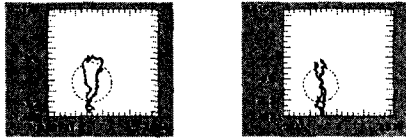
이때 CCS Orbit의 직경 변화비는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 궤적의 중심을 지나며 서로 직교하는 최소 직경에 대한 최대 직경의 비로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{직경변화비} = \frac{\text{CCS Orbit의 최대직경}}{\text{CCS Orbit의 최소직경}} \quad (2)$$

그리고 Fig. 7은 이들 실험에서 나타난 실험 A와 실험 B에 대한 초기 편심량과 Orbit 직경변화비와의 관계를 나타낸 것이다.

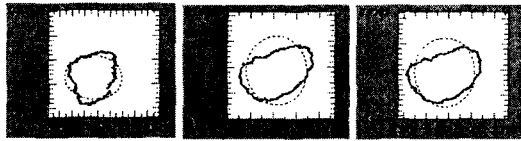


편심량: 0.40mm 편심량: 0.56mm 편심량: 0.65mm



편심량: 0.82mm 편심량: 1.08mm

(a) Experiment A



편심량: 0.34mm 편심량: 0.52mm 편심량: 0.65mm



편심량: 0.82mm 편심량: 0.98mm

(b) Experiment B

Fig. 5 Magnitude of CCS Orbit due to initial eccentricity.

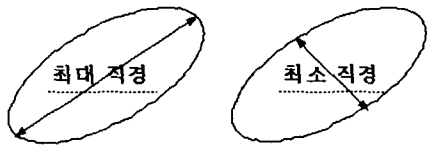


Fig. 6 Ratio of diameter alternating range.

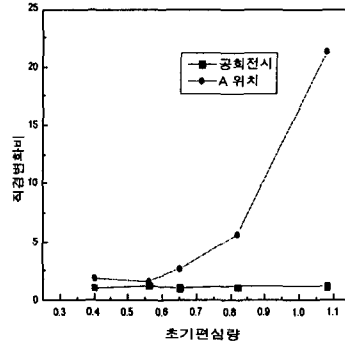
실험 A에서는 직경의 변화비가 급격히 증가하였으며, 이것은 궤적의 최소 직경이 매우 작게 나타났기 때문이다.

또한, 실험 B에서는 직경변화의 비가 상대적으로 매우 작게 나타남을 알 수 있다.

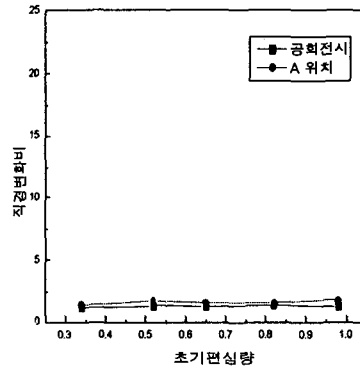
(2) CCS Orbit의 중심 이동량 L의 크기

가공물의 절삭시 주축의 중심궤적을 나타내는 CCS Orbit에서 이의 중심은 변하게 되는데 주축으로부터 가장 먼 거리인 Cutting Position A에서부터

절삭이 이루어지면서 B를 거쳐 C까지 절삭을 완료하게 된다. 이때 공회전시의 CCS Orbit의 중심좌표와 각 Cutting Position에서의 CCS Orbit의 중심좌표와의 거리를 비교하였다.



(a) Experiment A



(b) Experiment B

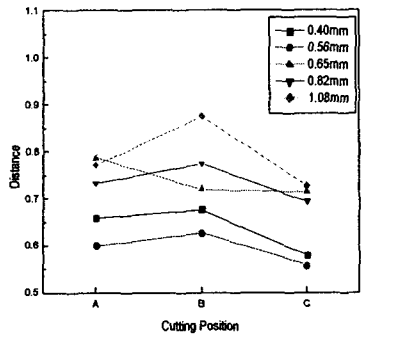
Fig. 7 Relationship between initial eccentricity and diameter alternating range of orbit.

공회전시 CCS Orbit의 중심좌표를 (x_0, y_0) 라 하고, 세 절삭지점에서의 중심좌표를 (x, y) 라 할 때 CCS Orbit의 중심이동량 L은 다음과 같다.

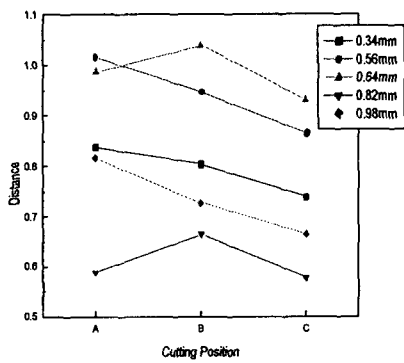
$$L = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (3)$$

한편 Fig 8은 3가지의 절삭지점에 대해서 초기 편심량에 따른 중심이동량의 변화를 나타낸 것이다.

실험 A와 실험 B에서 중심이동량 L의 크기는 대체로 절삭지점이 A 위치에서 B 위치로 갈수록 증가하다가 C 위치로 갈 때 감소함을 알 수 있는데, 이는 주축의 강성과 절삭력과의 상관관계와 밀접한 관련이 있다.



(a) Experiment A



(b) Experiment B

Fig. 8 Shift of cutting position and orbit center.

(3) 편심량에 따른 절삭력 중 주분력 변동량

절삭가공 중 초기 편심량에 의하여 절삭깊이가 변화하며 이에 따라 절삭력도 변화한다. 이때 측정된 절삭력 중에서 주분력의 최대치 Fx_{max} 와 최소치 Fx_{min} 의 차를 통해 주분력 변동량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

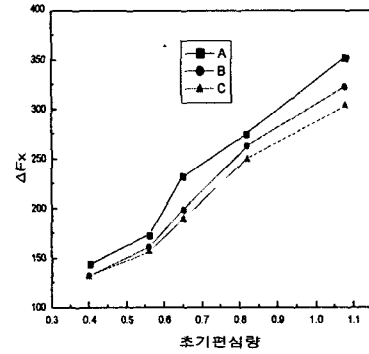
$$\text{주분력 변동량}(\Delta Fx) = Fx_{max} - Fx_{min} \quad (4)$$

이 때의 주분력 최대치는 절삭깊이가 최대가 되는 지점에서 일어나며, 최소치는 절삭깊이가 최소가 되는 지점에서 측정되는 것으로 사료된다.

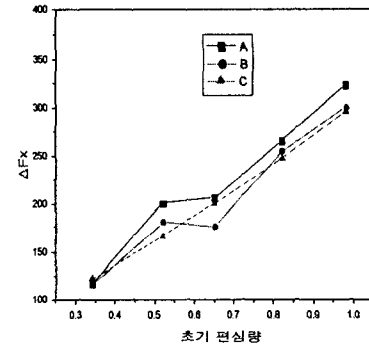
Fig. 9는 초기 편심량에 따른 주분력 변동량의 관계를 절삭지점별로 나타낸 것이다.

초기 편심량의 크기가 클수록 절삭깊이가 커지므로 주분력의 변동량도 많이 나타남을 알 수 있으며, 또한 절삭지점 A, B, C 에서는, A에서의 주분력의 변동량이 가장 크고, C지점에서의 주분력 변동량은 작게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

실험 A와 실험 B에서 모두 초기 편심량이 커질수록 주분력의 절삭력 변동량은 선형적으로 증가하는데, 이것은 초기 편심량이 증가할수록 최대 절삭깊이도 또한 증가하기 때문이다.



(a) Experiment A



(b) Experiment B

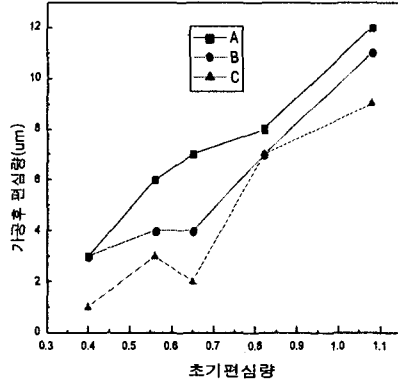
Fig. 9 Relationship between initial eccentricity and principal component of cutting force.

(4) 초기 편심량에 따른 가공후의 편심량

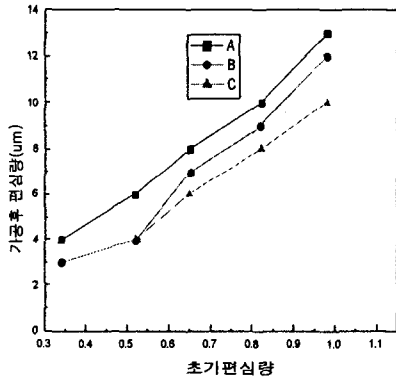
초기 편심량이 주어진 상태에서 가공하였을 때 가공후의 편심량을 절삭지점별로 나타낸 것은 Fig. 10에서 보는 바와 같다.

실험 A와 실험 B에서 초기 편심량에 따른 가공 후 편심량은 대체적으로 초기 편심량이 커짐에 따라 가공후 편심량도 선형적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 실험 B에서는 실험 A에 비해서 가공후 편심량의 증가도가 더 뚜렷하게 선형성을 보이고 있음을 알 수 있는데, 이는 실험 A의 경우 초기의 최소편심량 값이 0.1 mm로 실험 B의 경우에 비하여 작기 때문에 나타나고 있는 치수효과로 볼 수 있다. 그리고 실험 A의 경우 절삭지점 A보다

는 B와 C의 지점에서 선형성이 많이 벗어나고 있는 것은 가공후 편심량의 절대값이 적기 때문에 발생되는 치수효과로 볼 수 있다.



(a) Experiment A



(b) Experiment B

Fig. 10 Relationship between initial eccentricity and eccentricity of machined surface.

이러한 결과로 볼 때, CCS 신호를 이용하여 가공후의 편심량을 검출하는 것은 0.1 mm 정도의 초기 편심량 이하에서는 그 선형성에 다소 어려움이 발생하고 있어서 향후 CCS 신호의 감도를 높이는 방안이 더욱 개발되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

이상과 같이 CNC 선반에서 CCS 신호를 이용하여 초기편심량, 절삭력의 특성 및 가공후 편심가공 오차를 실험적으로 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭가공시 가공물이 편심되었을 때, CCS Orbit 궤적의 형상은 최소 절삭 깊이에 따라 그 형상이 결정되며 편심량이 클수록 궤적의 직경비도 커지고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 각 절삭지점에 따른 가공후의 편심량은 척에서 멀리 떨어진 지점일수록 큰 값을 보이고 있으나, 초기편심량에 대한 선형성은 오히려 척에서 멀어질수록 좋아짐을 알 수 있었다.
- (3) CCS 신호를 이용한 초기 편심량, 절삭력, 가공후 편심량 사이의 선형관계는 편심량 절대값의 치수효과로 인하여 측정할 수 있는 한계치가 있음을 알 수 있었다.
- (4) CCS 신호와 가공후 편심량 사이의 선형관계를 이용하면, CNC 선반에서의 자동 편심량 측정시스템으로 주축변위센서를 활용하여 편심량 절대치를 추정해 낼 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- 1) 三井公之, "정도 진단 기술의 연구(3점법의 주축 회전 정도 측정 장치의 개발)", 일본기계학회논문집 C편, 48권 525호, 1982, pp.115~123.
- 2) 한용교, 노병욱, 허민석, "진원도 측정기의 오차 특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집 제13권 1989, pp.862~874.
- 3) 원종식, 오민석, 정윤교, "AE 신호 분석에 의한 구성인선의 감지" 한국정밀공학회지 제16권 제3호 1999.
- 4) 김진현, 김일해, 장동영, 한동철, "주축 변위 측정을 통한 공구 마모 진단에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1990.
- 5) 김일해, 박상신, 한동철, "원통형 캐패시턴스 센서를 이용한 초정밀 공기주축의 회전오차 측정", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1995.
- 6) 김일해, 장동영, 한동철, "주축 변위 센서를 이용한 절삭력 측정에 관한 연구" 한국공작기계학회 논문집, 2002.