

# CNC선삭시 주축변위센서를 이용한 편심 가공오차와 절삭력 변화특성의 검출

맹희영\*, 김성동\*

## Monitoring of Eccentric Machining Error and Cutting Force Variation using Cylindrical Capacity Spindle Sensor on CNC Turning

Heeyoung Maeng\*, Sungdong Kim\*

### Abstract

This paper presents the methodology for measuring eccentricity of the machined cylindrical part using CCS(cylindrical capacitance spindle sensor) signal in the CNC turning process.

We use capacitance type sensor to take full advantage of averaging effect by using large capacitance area to encompass the whole side of a sensor.

The intentionally proposed initial eccentricity is applied to the experimental testpieces, and their resultant relationships between CCS orbits and eccentricities are investigated.

As a result, the possibility as a automatic detection apparatus for the CNC lathe is considered based on the linearities of CCS signal and magnitude of eccentricity of machined cylindrical surfaces.

**Key Words:** CCS(cylindrical capacitance spindle sensor), *Eccentricity of cylindrical part, cutting force, cutting condition, surface roughness.*

## 1. 서 론

CNC 선삭과정에서 가공시스템의 자동화를 위해서는 가공물과 공구를 중심으로 가공 품질에 영향을 미치는 인자들에 대한 자체 모니터링 기능이 필수적이다. 공작기계의 주축 회전정밀도는 가공물의 진원도와 표면거칠기 사이에 밀접한 관계가 있다. 가공물이 편심되었을 경우, 절삭깊이 변화가 심해지며 그 반작용으로 주축의 회전중심을 변화시키고 아울러 절삭력 변화를 증폭시켜 진원도와 표면거칠기에 악영향을 준다.

주축변위센서는 절삭시 공구동력계를 통해 구해진 절삭력 신호와 주축변위센서 신호와의 선형적 관계를 이용하여 상시 모니터링하는 데에 이용하고 있다.<sup>(1)</sup>

주축변위센서를 이용하여 공작기계 주축의 회전오차 측정을 하기 위해서는 원주면에 따라 4분할된 센서 면을 전부 둘러싼 가드 전극을 설치하여 형상공차가 제거된 주축의 순수 회전궤적을 측정한다. 최근에는 주축 변위센서를 이용하여 가공중의 주축 변위를 측정, 주축변위와 절삭력의 관계를 실험적으로 검토하여 센서 설치 위치의 최적 위치가 밝혀져 있기도 하다.<sup>(2)</sup>

따라서 본 연구에서는 원통형 정전용량 주축 변위센서를 이용하여 초기 편심량 변화에 따른 회전중심의 궤적을 구하고, 동시에 절삭력 변화를 측정하여 이들 사이의 상관관계를 선형적으로 분석하고자 하였다. 초기 편심량 크기에 따른 가공후 진원도 오차와의 상관관계를 추적함으로써 상시모니터링의 실용성을 검토하였다.

\* 발표자

\* + 서울산업대학교 기계설계자동화공학부, maeng@snut.ac.kr, sdkim@snut.ac.kr  
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉동 172번지

## 2. 주축 변위센서의 설치와 검출 과정

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 제작되었다. 원통형 정전용량 센서는 주축 하우징 커버 부에 부착되어 척 외경과의 틈새에 형성되는 정전용량 값을 통해 주축의 반경방향의 변위를 측정한다.

센서 측정면의 경우, 측정면인 마스터 링, 마스터 실린더 혹은 주축의 측정 대상 부위의 진원도, 표면거칠기가 일정 수준 이하일 것이 요구 된다. 0.1 $\mu\text{m}$ ~1 $\mu\text{m}$  정도의 센서 분해능이 필요한 경우 측정면은 5~10 $\mu\text{m}$ 이하일 것이 요구되며, 주축 부품 가공 정밀도는 이보다 양호하여 5 $\mu\text{m}$ 이내의 값을 가지는 것이 보통이다.

주축 변위 센서를 이용한 간접적인 절삭력 측정은 절삭력에 의해 야기된 유한 강성 주축의 변위 변동량에 의한 것이다. 따라서 변위 측정 정밀도가 높아질수록 이를 유발한 절삭력의 변동량을 더욱 정밀하게 측정할 수 있다. 절삭 가공에서의 절삭력은 수십에서 수백 N 정도의 값을 보이며, 수십 N 이하의 절삭력 변동량에 대해 민감하여야 이상 진동 및 마멸에 대한 관측이 가능하다. 공작기계 주축은 통상 10~20kgf/ $\mu\text{m}$ 의 강성을 가지며 이 경우 10N 정도의 절삭력 변화를 관측하기 위해서는 50~100nm 정도의 변위 분해능이 필요하다. 주축의 강성이 낮은 경우에는 같은 절삭력에 대한 주축 변위가 크므로, 요구되는 변위 분해능 수준도 낮다.

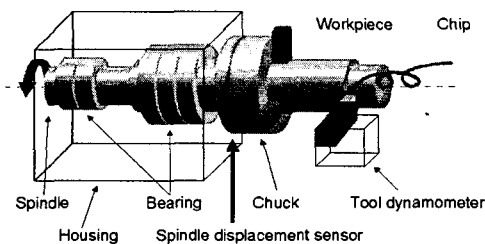


Fig. 2 주축 변위센서의 설치

본 연구에서 사용한 정전용량 주축 변위센서는 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 제작된 것이다. 본 센서의 변위 분해능은 공작기계 주축의 강성을 고려하면 약 5N 이내의 절삭력 변화를 측정할 수 있다. 여기서 변위 분해능은 설계 수치 및 시스템 노이즈 수준, 측정 범위에 따라 차이가 나는데, 실제 적용사례에서는 20nm까지 실현된 바 있다.

## C3. 실험 장치 및 방법

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. 절삭력 측정을 위한 공구동력계의 경우, 낮은 주파수대역에서 우수한 특성을 보이는 반면, 1kHz 이상에서의 응답특성은 좋지 않은 편이다. 정전용량을 이용한 원통형 변위센서는 약 10kHz의 주파수대역을 가지도록 제작된 것을 사용하였다. 신호처리를 위해서는 PC를 사용하였으며, DT-3010 AD 보드와 HP-VEE를 사용하여 변위 신호 및 절삭력 신호의 측정 및 후처리를 하는데 사용하였다.

본 실험에 사용한 시험편의 재료는 기계구조용 탄소강인 SM45C를 선택하였으며 직경이 80mm이고 길이가 100mm 되도록 가공하였다. 시험편은 CNC 선반에 인위적으로 은박지를 이용하여 초기편심량을 주도록 시험편을 척에 설치하고 초기편심량을 분해능이 10 $\mu\text{m}$ 인 다이얼 게이지를 이용하여 시험편의 이송량을 3등분 한 지점을 기준으로 측정하였다. 가공은 절삭속도 200m/min, 이송 0.1mm/rev을 주고 절삭깊이는 실험조건에서 주어진 값으로 가공하였다. 가공후 편심량의 측정은 다이얼 게이지를 사용하여 공작물의 이송량을 3등분한 지점(Cutting Position A, B, C)을 기준으로 하여 분해능이 2 $\mu\text{m}$ 인 다이얼 게이지를 사용하여 측정을 하였다. 또한 주축변위센서를 이용하여 주축의 중심 궤적인 CCS Orbit, x방향 변위인 CCS x, y 방향 변위인 CCS y를 측정하였으며 공구동력계를 이용하여 절삭력의 삼분력인 주분력, 배분력, 이송분력을 측정하였다. 이때 측정된 데이터를 이용하여 초기편심량에 따른 CCS Orbit 직경변화비, CCS Orbit의 중심이동량, 절삭력 변동량, 배분력비, 이송분력비, 가공후 편심량의 관계를 이용하여 이들 데이터의 선형적 관계를 분석하였다.

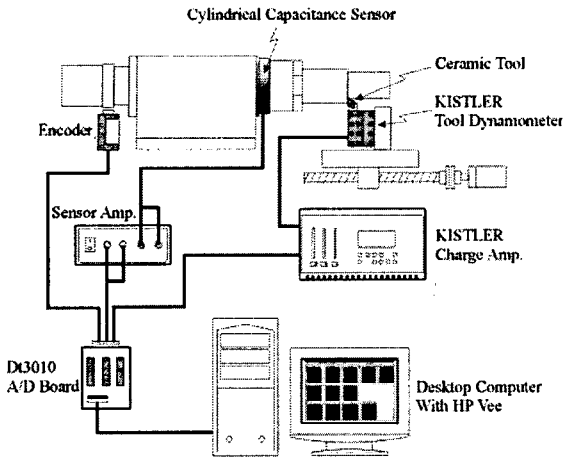


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

한편 실험에 사용된 편심량의 결정은 Table 1과 같다. 절삭 가공시 시험편이 편심되었을 경우, 절삭은 절삭깊이가 최소 및 최대가 되는 상태가 반복되어지면서 이루어진다.

Table 1 편심량에 따른 실험조건

실험편류	실험번호	최소절삭깊이 (mm)	최대절삭깊이 (mm)	절삭깊이 변동량(d)
A	A-1	0.1mm	0.5mm	0.4mm
	A-2	0.1mm	0.55mm	0.45mm
	A-3	0.1mm	0.74mm	0.64mm
	A-4	0.1mm	0.92mm	0.82mm
	A-5	0.1mm	1.18mm	1.08mm
B	B-1	0.2mm	0.54mm	0.34mm
	B-2	0.2mm	0.76mm	0.56mm
	B-3	0.2mm	0.84mm	0.64mm
	B-4	0.2mm	1.02mm	0.82mm
	B-5	0.2mm	1.18mm	0.98mm

이때, 시험편의 편심은 절삭깊이의 변화에 따라서 선반 주축의 회전 중심을 변화시키고, 아울러 절삭력의 증감도 반복된다. 따라서 본 실험에서는 절삭 깊이가 최소가 되는 양을 0.1mm, 0.2mm를 기준으로 하여 절삭 깊이의 가변량을 달리하여 실험 조건을 선정하였다. 또한 최소 절삭깊이가 0.1mm인 경우의 실험을 실험 A로, 0.2mm인 경우를 실험 B로 정하여 비교 실험하였다.

측정을 위한 Cutting Position의 결정은 Fig. 3과 같이 절삭위치에 따라 A, B, C로 정하여 데이터의 측정 및 분석에 사용하였다.

절삭 속도와 이송량은 사용한 피삭재가 SM45C인 점을 고

려하여 절삭 속도는 200m/min, 이송량은 0.1mm/rev으로 주어 가급적 표면 거칠기의 영향을 최소화하였다. 절삭 공구는 Table 2에서 주어진 대한중석의 CNMG120408 KT150의 인서트로 하였다.

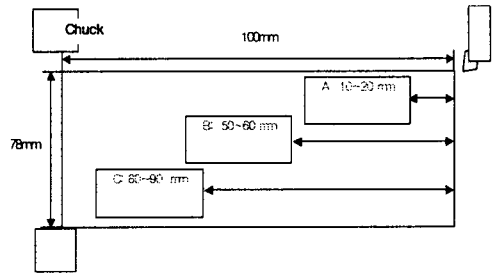


Fig. 3 시험편의 편심량 측정 구간

Table 2 인서트의 사양

형상	미름모 정각 80°	여유각	0°
Chip Breaker	양면	내접원직경 (mm)	12.70 mm
두께	4.76mm	노우즈 반경	0.8 mm

#### 4. 실험결과 및 고찰

가공물을 설치한 후 다이얼 게이지를 이용한 초기편심량을 측정하였으며, 가공물의 공회전시와 가공 중 Cutting Position A, B, C에서의 주축의 중심궤적인 CCS Orbit, 주축변위 ccs x, ccs y, 절삭력의 3분력 즉 주분력 Fx, 배분력 Fy, 이송분력 Fz를 측정하였으며 가공 후 편심량을 측정하여 이 결과를 실험A(최소절삭깊이 0.1mm)와 실험B(최소절삭깊이 0.2mm)를 비교 고찰하였다.

##### 4-1. 초기 편심량에 따른 CCS Orbit의 직경 변화비

실험조건 A와 실험조건 B에서 주어진 것과 같이 최소 절삭깊이를 일정하게 하고 초기 편심량에 변화를 주면서 절삭속도 200mm/min, 이송량은 0.1mm/rev로 가공하면서 가공중에 변화하는 주축의 중심궤적인 CCS Orbit를 측정하였다.

측정된 전체 데이터 중 Cutting Position A에서의 CCS Orbit의 값을 찾아 Fig 4에 나타내었으며, 초기 편심량과 최소절삭깊이에 따라 그 형상의 변화를 알 수 있다.

이때 CCS Orbit의 최대직경의 크기와 최소직경의 크기를 측정하여 이들 사이의 비를 직경 변화비라 할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{직경 변화비} = \frac{\text{CCS Orbit의 최대직경}}{\text{CCS Orbit의 최소직경}}$$

CCS Orbit의 직경 변화비는 궤적의 중심을 지나며 서로 직교하는 최소 직경에 대한 최대 직경의 비로써 실험 A와 실험 B에서 그 값이 분명히 다를 수 비교할 수 있다.

Fig. 5는 실험A와 실험B에서 초기편심량과 Orbit 직경 변화비의 관계를 나타내고 있다. 실험A(최소 절삭깊이 0.1mm)에서 초기편심량이 1.08mm에서 직경의 변화비가 급격히 증가하였으며, 이것은 궤적의 최소 직경이 매우 작게 나타났기 때문이다.

또한, 실험B(최소 절삭깊이 0.2mm)에서는 실험A인 경우보다 직경변화의 비가 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다.

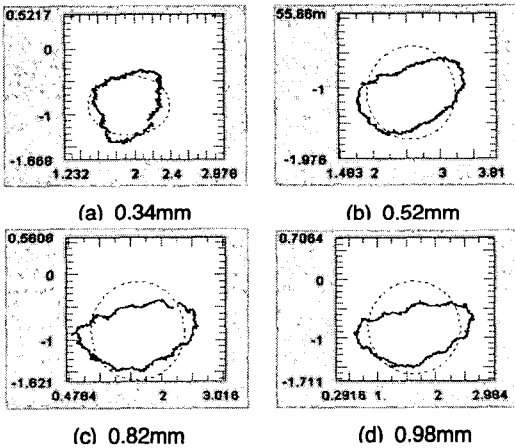


Fig. 4 초기 편심량에 따른 CCS의 Orbit의 크기의 변화

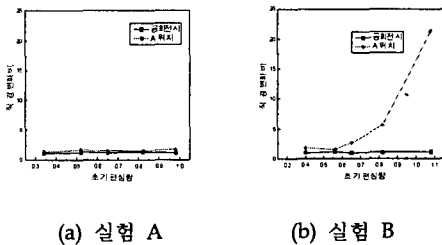


Fig. 5 초기 편심량과 Orbit의 직경 변화비의 관계

#### 4.2. 편심량에 따른 CCS Orbit의 반경 변동비

실험에서 구한 주축의 중심궤적인 CCS Orbit의 값을 초기 편심량에 따른 가공물의 가공 중 Cutting Position A에서의 CCS Orbit의 최대반경의 크기와 최소반경의 크기의 비를 반경 변동비라 할 때 다음과 같이 구할 수

있다.

$$\text{반경 변동비} = \frac{(R_{\max} - R_{\min})}{R_{\min}}$$

편심량에 따른 CCS반경 변동비는 궤적의 중심으로부터 최대 반경( $R_{\max}$ )과 최소 반경( $R_{\min}$ )을 구하여 계산하였다. 위에서 구한 반경변동비는 직경변화비와 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 실험A와 실험B에서 초기편심량과 Orbit의 반경 변동비의 관계를 나타내고 있다. 실험 A에서의 궤적의 반경 변동비는 편심량이 증가함에 따라 0.82mm~1.08mm 사이에서 급격히 증가하였으며 실험B에서는 궤적의 반경 변동비도 직경 변화비와 마찬가지로 편심량이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향이 나타났다.

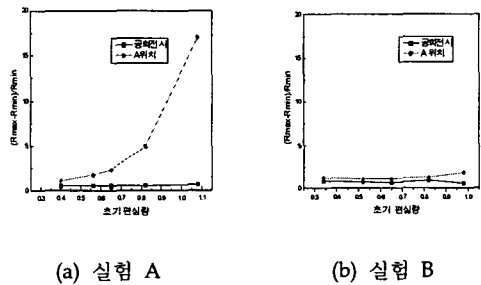


Fig. 6 초기 편심량과 Orbit의 반경 변동비의 관계

#### 4.3. CCS Orbit의 중심 이동량 L의 크기

가공물의 절삭시 주축의 중심궤적을 나타내는 CCS Orbit에서 중심은 변하게 되는데 주축으로부터 가장 먼 거리인 Cutting Position A에서부터 절삭이 이루어지면서 Cutting Position B를 거쳐 Cutting Position C를 거친 후 절삭을 완료하게 된다.

이때 공회전시의 CCS Orbit의 중심좌표와 각 Cutting Position에서의 CCS Orbit의 중심좌표와의 거리를 비교하고자 한다.

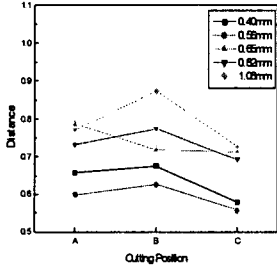
공회전시 CCS Orbit의 중심좌표를  $(x_0, y_0)$ 라하고 세 Cutting Position에서의 중심좌표를  $(x, y)$ 라 할 때 CCS Orbit의 중심 이동량 L을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

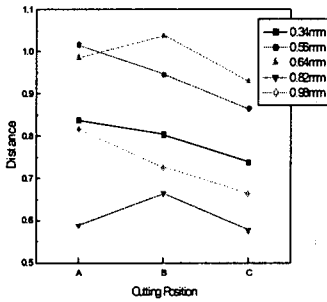
Fig. 7은 초기 편심량에 따른 Cutting Position 별 중심 이동량의 관계를 나타내고 있다.

실험A와 실험B에서 Cutting Position A 위치에서의 중심 이동량 L보다 Cutting Position C 위치에서 중심이동량 L의 크기가 감

소함을 알 수 있으며 절삭조건에 따라서는 A위치 보다 B위치가 더 증가함을 알 수 있어 이것은 주축의 강성과 절삭력의 관계에 기인한다고 볼 수 있다.



(a) 실험 A



(b) 실험 B

Fig. 7 Cutting Position과 Orbit의 중심 이동량의 관계

#### 4-4. 편심량에 따른 절삭력 중 주분력 변동량( $\Delta F_x$ )

절삭 가공 중 초기 편심량에 의하여 절삭깊이가 변화하며 이에 따라 절삭력도 변화한다. 이때의 절삭력을 측정하였으며 절삭력 중에서 주분력의 최대치  $F_{x_{max}}$ 와 최소치  $F_{x_{min}}$ 의 차를 주분력의 변동량이라 하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{주분력 변동량}(\Delta F_x) = F_{x_{max}} - F_{x_{min}}$$

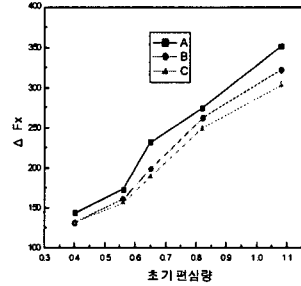
이때의 주분력의 최대치는 절삭깊이가 최대가 되는 지점에서 일어나며 최소치는 절삭깊이가 최소가 되는 지점에서 측정되어 진다고 생각된다. 초기 편심량에 따른 주분력의 변동량의 관계와 Cutting Position에 따른 주분력의 변동량의 관계를 알아보고자 한다.

##### (1) 초기 편심량에 따른 주분력의 변동량( $\Delta F_x$ )

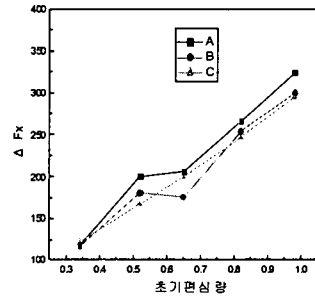
Fig. 8은 초기 편심량에 따른 주분력 변동량의 관계를 Cutting Position 별로 나타낸 것이다. 초기 편심량의 크기가 클수록 절삭깊이가 커지므로 주분력의 변동량도 많게 나타남을 알 수 있다.

또한 Cutting Position A, B, C에서의 주분력의 변동량을 비교하

여 보면 A에서의 주분력의 변동량이 제일 크고 C지점에서의 주분력의 변동량이 작은 것은 주축의 강성과도 관계가 있음을 알 수 있다.



(a) 실험 A



(b) 실험 B

Fig. 8 초기 편심량과 주분력 변동량의 관계

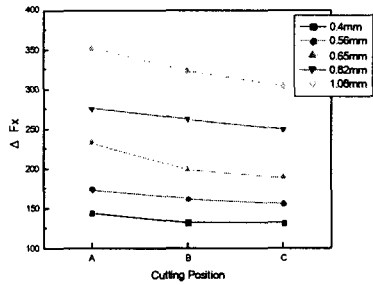
실험 A와 실험 B에서 모두 초기 편심량이 커질수록 주분력의 절삭력의 변동량은 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으며 이것은 초기 편심량이 증가할 수록 최대 절삭 깊이도 또한 증가하기 때문이다.

##### (2) Cutting Position에 따른 주분력 변동량( $\Delta F_x$ )

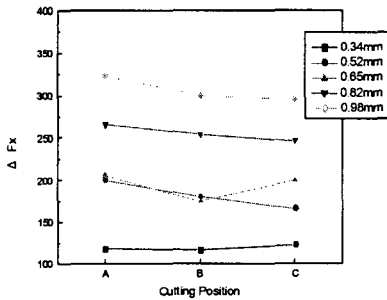
Fig. 9는 Cutting Position A, B, C에 따라 절삭력 중 주분력 변동량을 초기 편심량에 따른 변화를 나타내고 있다.

실험 A와 실험 B에서 편심량이 큰 A위치에서 주분력의 변동량이 크고 A→C로 진행함에 따라 대체적으로 작아지는 것을 알 수 있다.

이것은 A위치가 C 위치보다 굽힘모멘트에 의한 편심이 크고, 그 결과 A→C로 진행함에 따라 최대 절삭 깊이는 작아지기 때문이다. 또한 초기 편심량이 클수록 주분력 변동량도 크게 나타남을 알 수 있다.



(a) 실험 A



(b) 실험 B

Fig. 9 Cutting Position과 주분력 변동량의 관계

#### 4-5. 절삭깊이의 변동비와 절삭력 중 주분력의 변동비의 관계

최소 절삭깊이  $D_{min}$  와 최대 절삭깊이  $D_{max}$  의 비를 절삭깊이의 변동비라 하고 절삭력 중 주분력의 최대치  $F_{x_{max}}$  와 최소치  $F_{x_{min}}$  의 비를 주분력의 변동비라 하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{절삭깊이의 변동비} = \frac{D_{max}}{D_{min}}, \quad \text{주분력의 변동비} = \frac{F_{x_{max}}}{F_{x_{min}}}$$

또한 각 실험별 절삭깊이의 변동비는 Table 3과 같다.

(1) 절삭깊이의 변동비에 따른 주분력의 변동비의 변화

Fig. 10은 절삭깊이의 변동비와 주분력의 변동비의 관계를 Cutting Position 별로 나타내고 있다.

실험A와 실험B에서 절삭 깊이가 증가할수록 주분력의 변동비도 증가하는 경향을 보여주고 있으며 이것은 깊이의 차이가 클수록 회전 방향으로 가해지는 힘의 변화도 크게 나타남을 알 수 있다.

(2) Cutting Position에 따른 주분력의 변동비의 변화

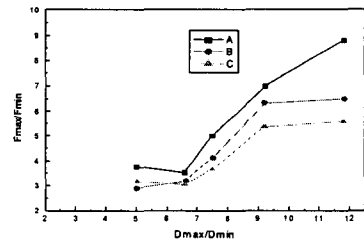
Fig. 11는 Cutting Position에 따른 주분력의 변동비의 관계를 절삭깊이의 변동비별로 나타내고 있다. 실험A와 실험B에서 절삭깊이의 변동비가 클수록, 즉 절삭 깊이의 변화가 심할수록 주분력의 변동비의 기울기도 커지는데, 이는 절삭 깊이의 변동이 클수록 절삭

력 변동량도 커지기 때문이다.

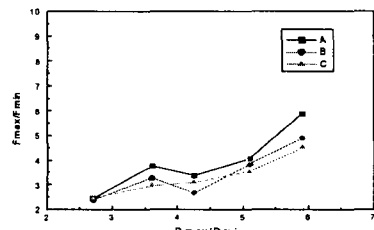
또한, Cutting Position이 A→C로 절삭이 진행함에 따라 절삭깊이의 변화가 작아져, 주분력의 변동비도 감소하였다.

Table 3 실험조건과 절삭깊이의 변동비

실험 구분	실험번호	최소절삭깊이 (mm)	최대절삭깊이 (mm)	절삭깊이 비 $D_{min}/D_{max}$
A	A-1	0.1	0.5	5.00
	A-2	0.1	0.66	6.60
	A-3	0.1	0.75	7.50
	A-4	0.1	0.92	9.20
	A-5	0.1	1.18	11.80
B	B-1	0.2	0.54	2.70
	B-2	0.2	0.72	3.60
	B-3	0.2	0.85	4.25
	B-4	0.2	1.02	5.10
	B-5	0.2	1.18	5.90



(a) 실험 A

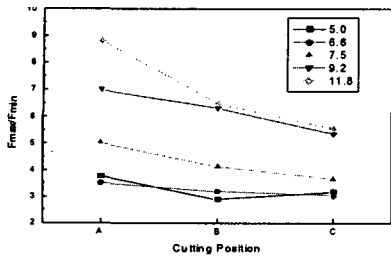


(b) 실험 B

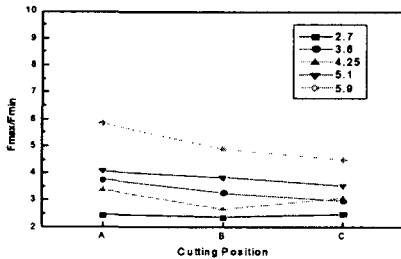
Fig. 10 절삭깊이의 변동비와 주분력의 변동비의 관계

4-6. 초기 편심량에 따른 Cutting Position 별 가공후의 편심량  
가공물에 초기 편심을 주어 가공하였을 경우 초기 편심량은 가공 후의 가공물의 편심에 얼마나 영향을 미치고 있는지를 알아 보았다

Fig. 12는 초기 편심량에 따른 가공후 편심량을 Cutting Position 별로 나타내고 있다.



(a) 실험 A

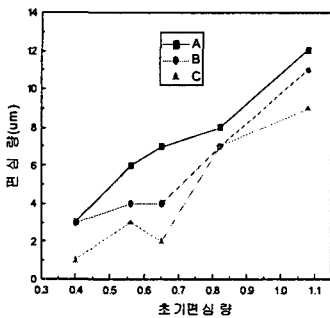


(b) 실험 B

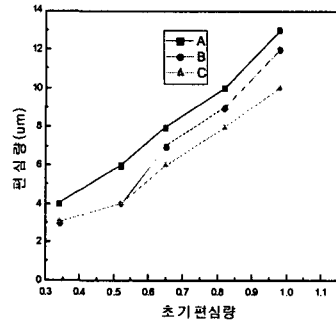
Fig. 11 Cutting Position과 주분력 변동비의 관계

실험A와 실험B에서 초기 편심량에 따른 가공 후 편심량은 대체적으로 초기 편심량이 커짐에 따라 가공 후 편심량도 증가하였으며, 실험B에서 가공 후 편심량의 증가가 실험A 보다 좀 더 뚜렷하게 나타났다.

실험B가 실험A 보다 가공 후 편심량은 대체적으로 1 $\mu$ m정도 크게 나타났으며, 한 회 절삭에 대해서, 절삭이 A→C로 진행함에 따라 가공 후 편심량의 크기는 대체적으로 작아졌다. 이것은 C방향으로 절삭이 진행함에 따라 초기 편심량도 작아지기 때문이다.



(a) 실험 A



(b) 실험 B

Fig. 12 초기 편심량과 가공 후 편심량의 관계

## VI. 결론

- (1) 절삭가공시 가공물이 편심되었을 때, CCS Orbit 궤적의 형상은 최소 절삭 깊이에 따라 그 형상이 결정된다.
- (2) 편심시 공작물은 외팔보와 같이 모델링 할 수 있고, 따라서 척에서 멀어질 수록 편심의 차가 커지기 때문에 가공 후 편심량과 절삭력의 변동, 궤적의 직경 변화비도 증가하였다.
- (3) 편심 가공시 배분력비는 편심량의 증가에 따라 점점 감소하는데, 이는 편심량이 클 수록 배분력의 변화보다도 주분력의 변화치가 더 크기 때문이다.
- (4) 편심 가공시 이송분력의 크기가 배분력보다 더 크게 작용을 하였으나, 이송분력비를 보면 일정한 경향을 갖지 않기 때문에 편심량의 증가와는 무관하다.
- (5) 주축의 회전 중심의 이동성은 최소 절삭 깊이에 따른 배분력의 변동량 크기의 영향으로 결정된다.

## 참고문헌

- (1) 김진현, 김일해, 장동영, 한동철, "주축 변위 측정을 통한 공구 마모 진단에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1990
- (2) 김일해, 박상신, 한동철, "원통형 캐패시턴스 센서를 이용한 초정밀 공기주축의 회전오차 측정", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1995
- (3) 김일해, 장동영, 한동철, "주축 변위 센서를 이용한 절삭력 측정에 관한 연구" 한국공작기계학회 논문집, 2002