

가로원통연삭시 연삭기와 공작물 및 방진구의 컴플라이언스를 고려한 방진구의 최적위치 선정

서장렬*, 이선규**

Optimum Positioning of Rests Considering Compliance of Grinding Machine, Workpiece and Rests in Cylindrical Traverse Grinding

Jang Ryeol Seo*, Sun Kyu Lee**

ABSTRACT

In the process of grinding a long slender type workpiece, such as ballscrew, by the external cylindrical grinding machine, the cylindricity of the workpiece depends on the distance of rests, the stiffness of supports, the diameter and material of workpiece. Conventionally the process needs to be supported by one or more rests to prevent static deflection and vibration. In this paper, the optimal position of the rests was investigated in order to minimize the cylindricity due to the static deflection, by taking compliance of the workpiece and structure into account. In order to obtain the optimal position of rests, a new modeling that is considering the spring effect of all support elements was established. Since it is so complicated to obtain the optimal position analytically for various conditions due to discontinuity, a genetic algorithm was utilized.

Key Words : Cylindrical Grinding Machine (원통연삭기), Rest (방진구), Traverse Grinding (가로연삭), Genetic Algorithm(유전알고리즘), Geometric Accuracy(형상오차)

1. 서론

생산현장에 있어서 정밀한 부품의 최종형상가공을 담당하는 원통연삭가공시, 길고 가는 공작물의 진동방지를 위하여 사용되는 방진구의 설치 방법에 대한 지침이 제대로 확립되어 있지 않아 작업자가 방진구의 간격을 임의로 설치함으로써 원하는 정도를 달성하기까지 장시간의 가공을 요하며 불량 발생의 원인이 되기도 한다. 따라서 방진구의 설치가 용이하고 장시간에 걸친 공작기계의 열변형에 따른 변화를 보상할 수 있는 방진구의 설

치 방법 및 자동 방진구의 필요성이 절실해지고 있다.⁽¹⁻⁸⁾ 연삭기의 방진구는 가늘고 긴 공작물의 연삭 중 진동을 방지하고 연삭력에 의한 공작물의 탄성변형에 의한 공작물의 형상오차 저하를 막기 위해 사용된다. 이때 형상오차는 방진구의 설치간격, 방진구, 주축센터, 심압대센터의 강성, 공작물의 직경 등에 의존한다. 여기서 작업 시 변경 가능한 인자는 방진구의 설치간격으로 이러한 설치 간격에 대해서는 종래에 가장 단순한 주축센터, 심압대센터 및 공작물 직경에 대한 관계만 검토되어 있다.⁽¹⁻⁸⁾ 이에 따르면 원통도 형상오차가 최소화되는 공작물의 형상은 양 끝과 중앙부의 치수는

* 광주과학기술원 기전공학과 대학원

** 광주과학기술원 기전공학과

크고 그 사이 사이는 잘록한 모양이다. 그러나 세장재의 가로연삭에서는 다수의 방진구를 사용하여 연삭가공을 행하므로 이에 대한 공작물의 가공형상 모델링이 요구된다. 이때 다양한 공작물 형상에 대한 최적의 방진구 위치결정을 위하여 매우 복잡한 수식 대신에 확률론적인 탐색법인 유전 알고리즘에 의한 최적화 방법이 효율적이다.⁽¹¹⁻¹⁴⁾ 본 논문에서는 방진구와 주축 및 심압대 센터를 스프링, 공작물을 연속보로 가정한 새로운 모델링 방법을 제시하고 이 모델을 바탕으로 공작물의 형상 변화에 대한 방진구의 최적위치를 유전알고리즘을 적용하여 구하고 이를 실험으로 확인함으로써 최적위치에서의 방진구 능동제어⁽¹⁵⁾를 위한 지침을 제시하고자 한다.

2. 가로연삭시 공작물 형상에 대한 역학적 모델링

가늘고 긴 공작물의 가로연삭(traverse grinding)시 연삭력이 공작물에 작용할 때 공작물의 변형에 대한 역학적 모델은 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 연삭기 주축대 및 심압대 센터의 강성과 공작물의 강성으로 구성된 모델을 해석하여 다수의 방진구 사용시도 양 센터와 방진구 또는 두 방진구 간에 이와 유사한 역학적 모델이 근사적으로 성립된다고 보는 것으로, 예를 들어서 1 개의 방진구로 지지된 계에 있어서는 주축센터와 방진구 구간만 각각의 스프링으로 지지된 것으로 해석한 뒤 방진구와 심압대센터 구간은 다시 그에 상응한 스프링으로 지지되었다고 가정하여 해석하는 방법, 즉 각 구간 이외의 스프링은 영향이 없다고 보는 것으로 이를 단순모델링(simple modeling)이라 한다. 둘째는 모델을 상세히 하여 연삭기의 양 센터와 모든 방진구를 유한한 강성을 가진 스프링으로 가정하고 유한한 강성을 가진 공작물이 이 스프링 위에 연속보로 지지되어 가로연삭이 이루어지는 역학적 모델로 이를 상세 모델링(detail modeling)이라 한다.

단순모델링의 경우, 가로연삭시 공작물의 형상 오차가 최소화되는 길이와 직경의 비가 간단한 수식으로 주어지기 때문에 계산이 간단하여 생산현장에서 이용하기 쉽다.⁽²⁾ 그러나, 정밀 볼스크류의 나사부 연삭 등과 같이 원통도 형상오차가 수 μm 이하를 요구하는 고정밀 가공에 있어서는 한 구간 내의 두 지지점 뿐만 아니라 인접하는 다른 지지점의 영향도 고려하는 상세한 모델링이 요구된다.

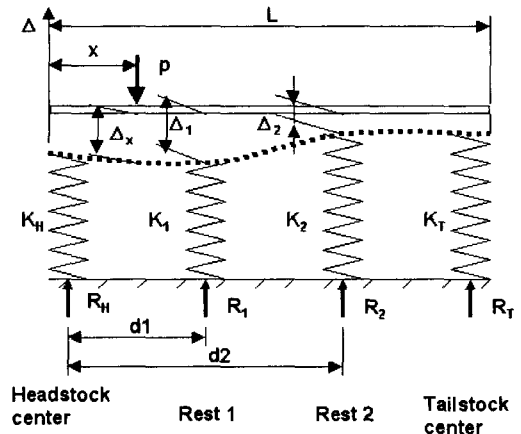
Fig. 1 은 2 개의 방진구 및 주축대와 심압대의 양 센터로 공작물을 지지하고 가로연삭을 할 때의

역학적 모델이다. 여기서 연삭력 p 가 x 위치에 작용하면 공작물은 Δ_x 만큼 변형하는데 이 변형의 부호를 바꾸면 가공후 중심선을 기준으로 한 상단의 공작물 형상이 된다.

먼저 이 모델을 단순모델링으로부터 확장하여, 방진구 2 와 심압대 센터는 공작물에 미치는 영향이 적어 무시할 수 있다고 가정하고, 연삭가공 후 가공물의 주축대센터와 방진구 1 사이의 형상 Δ_s 를 계산하면 다음과 같다.⁽²⁾

$$\Delta_s = \frac{p}{3EI} \frac{(d_1-x)^2 x^2}{d_1} + p \left[\frac{(1-x/d_1)^2}{K_H} + \frac{(x/d_1)^2}{K_1} \right] \quad (1)$$

나머지 구간에 대해서도 동일한 방법을 적용하면 연삭가공 후 공작물의 형상은 Fig. 2 와 같이 나타난다. 이때, 기본 가정으로 한 구간을 넘어선 지지점의 영향을 고려하지 않아 모델링 오차가 예상된다.



d_1 : distance between headstock center and rest1

d_2 : distance between headstock center and rest2

K_H, K_1, K_2, K_T : Stiffness of headstock center, rest1, rest2, tailstock center

p : grinding force

Δ : deflection or shape error

Fig. 1 New modeling using two rests for traverse grinding

다음으로 이 모델을 상세히 해석하기 위해 공작물이 Fig. 1 의 파선과 같이 변형한다고 가정하면, 이 구조물은 부정정보가 되므로 변위 일치의

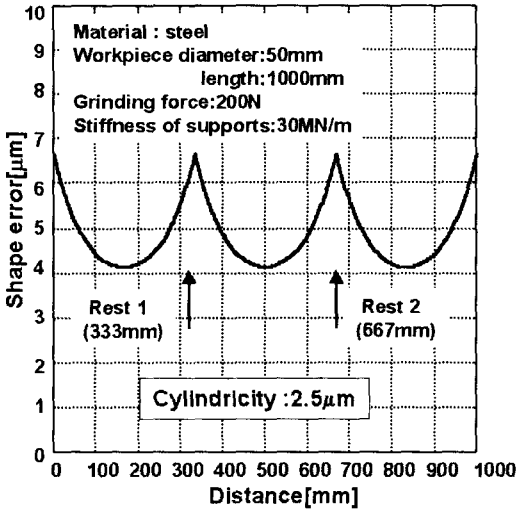


Fig. 2 Shape error using simple modeling

방법(method of consistent deformations)으로 해석하기 위해 방진구 1 과 방진구 2 의 반력 R_1 와 R_2 를 여분력(redundant force)으로 정해 각 힘을 분해함으로써 공작물은 주축대와 심압대에 지지되어 연삭력이 작용하는 단순보로 간주될 수 있다.⁽⁹⁾ 이때 공작물의 각 부분의 절대 변위는 지지점의 스프링 변형과 공작물 변형의 합이 된다. 연삭력에 의한 방진구 1 과 방진구 2 지지점의 변형을 Δ_{10} , Δ_{20} 라 하면, 식(2)로 나타낼 수 있다. (Fig. 3)

$$-\Delta_{10} = p \frac{(L-x)(2Lx d_i - x^2 d_i - d_i^3)}{6EIL} + p \frac{(d_i-x)^3}{6EI} + \frac{p(L-x)(L-d_i)}{K_H L^2} + \frac{pxd_i}{K_T L^2} \quad (2)$$

$0 \leq x \leq d_i$

$$-\Delta_{10} = p \frac{(L-x)(2Lx d_i - x^2 d_i - d_i^3)}{6EIL} + \frac{p(L-x)(L-d_i)}{K_H L^2} + \frac{pxd_i}{K_T L^2} \quad d_i \leq x \leq L$$

여기서, $i = 1, 2$

방진구 1 의 지지점에 단위하중을 가하여 방진구 1 과 방진구 2 의 유연도계수(flexibility coefficient) f_{11} , f_{21} 를 구하면 식(3), (4)와 같고 (Fig. 4)

$$f_{11} = \frac{(L-d_1)(2Ld_1^2 - 2d_1^3)}{6EIL} + \frac{(L-d_1)^2}{K_H L^2} + \frac{d_1^2}{K_T L^2} \quad (3)$$

$$f_{21} = \frac{(L-d_1)(2Ld_1 d_2 - d_1^2 d_2 - d_2^3)}{6EIL} + \frac{(d_2-d_1)^3}{6EI} + \frac{(L-d_1)(L-d_2)}{K_H L^2} + \frac{d_1 d_2}{K_T L^2} \quad (4)$$

방진구 2 의 지지점에 단위하중을 가하여 유연도계수 f_{12} , f_{22} 도 유사하게 구할 수 있다.

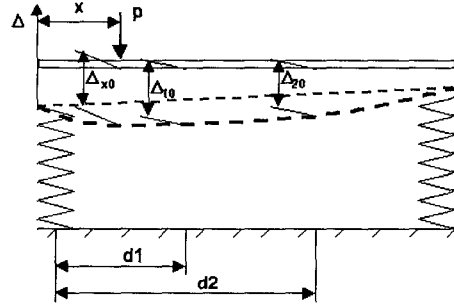


Fig. 3 Deflection of workpiece by primary beam subjected to grinding force

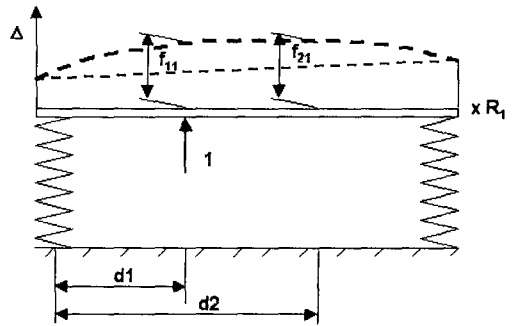


Fig. 4 Deflection of workpiece by primary beam loaded with redundant R_1

변위 일치에 의한 기하학적 적합조건은 여분력 R_1 및 R_2 에 의한 지지점의 변위와 연삭력에 의한 공작물의 변위가 일치해야 하므로 이를 Δ_1 , Δ_2 라 하면

$$\Delta_{10} + f_{11}R_1 + f_{12}R_2 = \Delta_1 = \frac{R_1}{K_1} \quad (5)$$

$$\Delta_{20} + f_{21}R_1 + f_{22}R_2 = \Delta_2 = \frac{R_2}{K_2}$$

가 된다. (5)식으로부터 부정정보의 여분력 R_1 과 R_2 를 구하고 나면, 나머지 반력 R_H 과 R_T 는 정정보의 관계식에서 구할 수 있다.

연삭력 p 가 작용하는 위치 x 에서의 변형 Δ_x 는 다음과 같이 구할 수 있다. 연삭력 p 에 의한 처짐 Δ_{x0} 는

$$-\Delta_{x0} = p \frac{(L-x)^2 x^2}{3EI} + \frac{p(L-x)^2}{K_H L^2} + \frac{px^2}{K_T L^2} \quad (6)$$

이 되고 반력 R_1, R_2 에 의한 x 위치의 변형 $\Delta_{R1x}, \Delta_{R2x}$ 는 (7)식으로 구할 수 있다.

$$\Delta_{Rix} = R_i \left[\frac{(L-d_i)(2Ld_i x - d_i^2 x - x^3)}{6EI} + R_i \left(\frac{x-d_i}{6EI} + \frac{R_i(L-d_i)(L-x)}{K_H L^2} + \frac{R_i d_i x}{K_T L^2} \right) \right] \quad (7)$$

여기서, $i = 1, 2$

따라서 중첩에 의해 Δ_x 는

$$\Delta_x = \Delta_{x0} + \Delta_{R1x} + \Delta_{R2x} \quad (8)$$

이 된다. 따라서 Δ_x 의 부호를 바꾸면 공작물의 형상이 된다.

Fig. 5는 각 반력의 영향선을 나타낸 것으로 단순 모델링에 의한 근사해석과 달리 방진구의 지지점 부근에서는 연삭력을 지지하는데 해당 방진구 이외에 양 옆의 지지점이 하중을 분담받아 해당 지지점의 처짐이 작아짐을 예측할 수 있다. 따라서 단순 모델링에서는 해당 지지점이 모든 하중을 받는 것으로 단순화시켰기 때문에 변형에 차이를 발생하게 된다. Fig. 6은 가로연삭 시 각 지지점의 강성이 동일한 경우 단순모델링과 상세모델링에 의한 공작물의 형상오차를 비교하여 나타내고 있다. 상세모델링에 의한 형상을 보면 반력의 영향선에서 예측할 수 있는 바와 같이 연삭력을 한 지지점에서 거의 모두를 받게 되는 양 센터의 변형이 가장 크고 다른 지지점은 해당 지지점외에 양 옆의 지지점이 하중을 분담함으로써 변형이 작아지고 있다. 따라서 형상오차가 단순모델링보다 작

아지고 공작물의 형상도 차이가 있음을 알 수 있다.

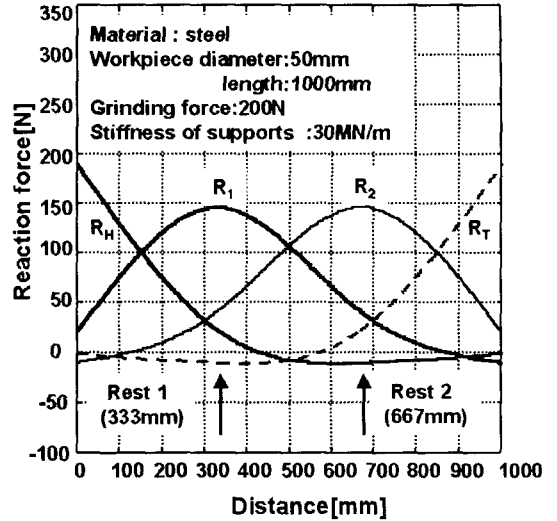


Fig. 5 Reaction force influence lines of supports according to the position of grinding

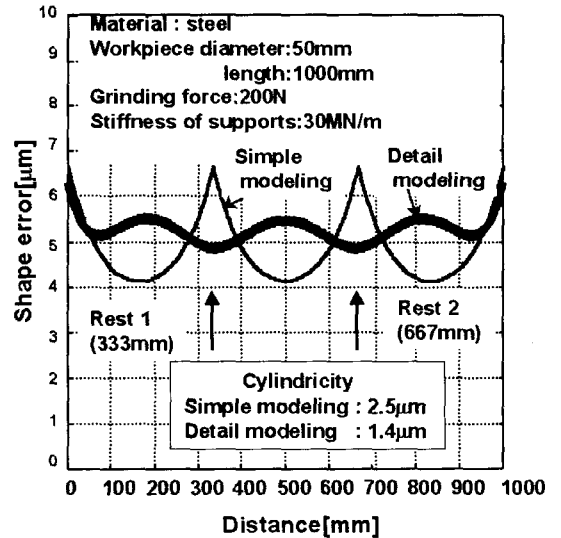


Fig. 6 Shape error using two rests on the case of same stiffness of all supports.

3. 방진구의 최적위치 설정

전술한 바와 같이 가로원통연삭시에 연삭기의 구조 때문에 주축대, 심압대, 공작물의 강성에 따라 방진구의 위치를 적절하게 선정해야 가공오차

를 감소시킬 수 있다. 최적설계분야에 있어서 지금까지의 설계개선과정은 초기설계를 해석한 후 해석결과를 토대로 설계민감도(design sensitivity analysis)를 구하고 이를 이용하여 설계개선방향을 정해서 개선방향에 대한 재해석을 통한 변화량(step-size)을 결정하는 것으로 수행되어졌다. 이 방법은 정확도 측면에서는 우수한 반면, 설계변수에 대한 도함수인 설계민감도가 요구되므로 함수들의 연속성 및 미분가능성에 제한이 가해지게 된다. 방진구 위치의 최적화 문제는 수식이 복잡, 기존의 최적화 방법의 적용이 곤란하기 때문에, 새로운 방법으로 유전알고리즘에 의한 최적화 방법을 적용하였다.

유전알고리즘으로 방진구의 최적위치를 설정하기 위해, 먼저 목적함수를 공작물 반경의 원통도 Ψ 로 정의하면 다음과 같다.

$$\Psi = \max(\Delta_x) - \min(\Delta_x) \quad (9)$$

유전알고리즘에서는 적응도(Fitness)의 크기에 따라 방진구 위치의 우열이 평가되고 적응도 F가 클수록 우수한 위치로 판정하므로 다음과 같이 정식화한다.

$$F = C - \Psi \quad (10)$$

여기서 C는 상수로서 어느 경우에도 C가 Ψ 보다 커야 한다.

Table 1은 공작물 직경 50 mm, 길이 1000 mm의 강봉을 2개의 방진구로 지지하고 가로연삭할 때 공작물의 원통도가 최소화되는, 방진구의 최적위치를 찾기 위한 유전알고리즘의 파라미터이다.

Table. 2는 각 지지점 강성의 여러 조합에 대하여 유전알고리즘에 의한 최적화 결과를 나타낸 것으로 양 센터의 강성이 방진구의 강성보다 높을 때 방진구 위치조정이 가공정도 향상에 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 7는 Table 2의 대표적인 경우로, 양 센터의 강성이 방진구의 강성보다 강하고, 연삭력 p가 200 N일 때 유전알고리즘에 의한 2개 방진구의 최적위치를 나타낸 것으로, 일반적인 지지 위치인 3등분 위치에서의 결과와 비교해서 보여주고 있다. 원통도 곡선에서 알 수 있는 바와 같이 방진구들이 공작물의 중앙으로 이동하여 공작물의 처

짐과 균형을 이루고 있다. 3등분 위치와 비교하여 원통도가 27.5% 정도 개선됨을 알 수 있다.

유전알고리즘에 의한 최적화 과정을 5회 반복하여 수렴성을 조사한 결과 약 20세대면 최적화되었다.

Table 1 Simulation parameter condition for optimal positioning of two rests

Population size	100
Crossover probability	50 %
Mutation probability	10 %
Chromosome length	32 bit
Fitness function (F)	$F = C - \Psi$ (Cylindricity)
Uniform crossover	
Elitist selection	
Windowing fitness scaling	
Diameter of workpiece(d)	50 mm
Length of workpiece(L)	1000 mm
Supporting region of rest 1(d_1)[mm]	$100 \leq X \leq 450$
Supporting region of rest 2(d_2)[mm]	$600 \leq Y \leq 900$

Table 2 Optimal position and effect of the support stiffness.

Stiffness (MN/m)	Optimum positions (d_1, d_2) (mm)	Cylindricity (μ m)	Improvement to equi-distance(%)
Headstock, Tailstock, Rests			
30, 30, 30	317, 684	1.33	7.0
30, 30, 20	346, 654	1.41	27.5
30, 30, 40	297, 703	2.24	7.1
30, 20, 30	375, 811	3.51	15.0

(workpiece : steel, diameter 50 mm, length 1000 mm, grinding force : 200 N)

4. 실험

4.1 실험장치 및 방법

Fig. 8은 상세모델링과 방진구 최적간격을 확인하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 균일

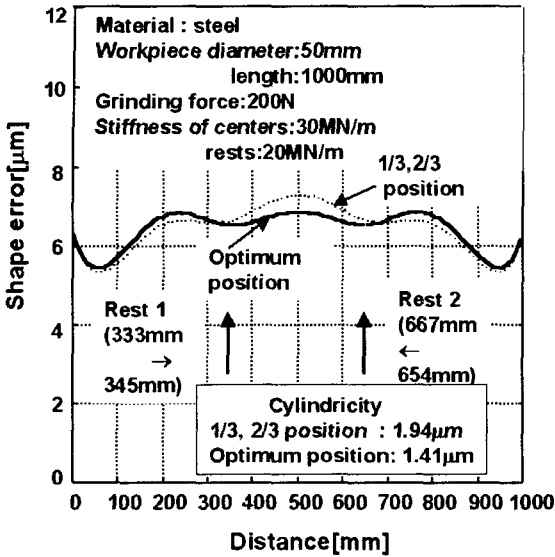


Fig. 7 Shape error of workpiece at optimal positioning of rests by Genetic Algorithm.

한 직경의 공작물을 방진구로 지지하고 가로연삭을 하게 되면 1회 연삭 도중에 방진구 지지점의 반경방향 치수가 바뀌어 연삭력과 공작물 형상이 시뮬레이션 결과와 다르게 되기 때문에, 방진구 지지위치의 직경을 미리 0.2 mm 가공하여 단차를 주었다. 공작물 가공 전 형상이 연삭 후 형상에 미치는 영향을 최소화하기 위해 스파크 아웃(spark out)을 10회 이상 실시 후 실험을 진행하였다. 공작물 형상의 측정은, 공작물이 길이 측정실에서의 측정이 어렵기 때문에 휠헤드부에 비접촉변위센서를 고정하고 테이블을 움직여 측정하였다. 테이블의 이송오차의 영향을 최소화하기 위해 연삭기의 이송시스템 부분의 오차 수준을 무시할 정도로 스크래핑하였다. 가공과 측정시 공작기계의 열변형이 테이블 운동에 영향을 미쳐 공작물의 가공형상과 측정결과에 영향을 미치기 쉽기 때문에 기계가 열적으로 안정되도록 3시간 이상의 충분한 예비운전을 한 후 실험하였다. 연삭가공시 연삭력의 측정은 방진구 지지로드 뒤쪽의 변위를 측정하여, 로드셀로 하중을 가하여 구한 교정그래프를 사용하여 추정하였다. Table 3은 가로연삭의 연삭조건을 나타내고 있다.

4.2 실험결과

Fig. 9는 공작물의 직경 36 mm, 길이 1000 mm의 침탄합금강을 주축센터 강성 30 MN/m, 심압대센터 강성 20 MN/m, 방진구 강성이 26 MN/m, 25 MN/m의 조건에서 80 N의 연삭력으로 방진구 위치를 등간격인 333 mm, 667 mm로 배치하고 1회

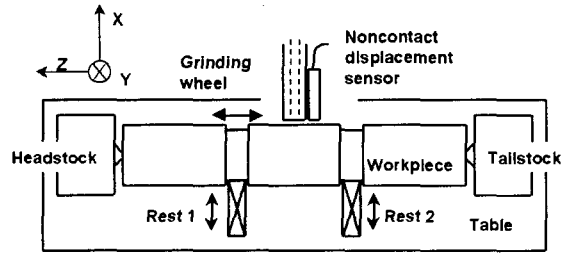


Fig. 8 Experimental setup

Table 3 Grinding conditions

Grinding machine	Precision cylindrical grinding machine (Toyoda, GUX25)
Wheel Width	WA80KV 38mm
Speed	1420rpm
Workpiece Speed	SCM415(HRC60) 60rpm
Diameter	36mm
Length	1000mm
Feed rate	12.5mm/rev
Coolant	Soluble type

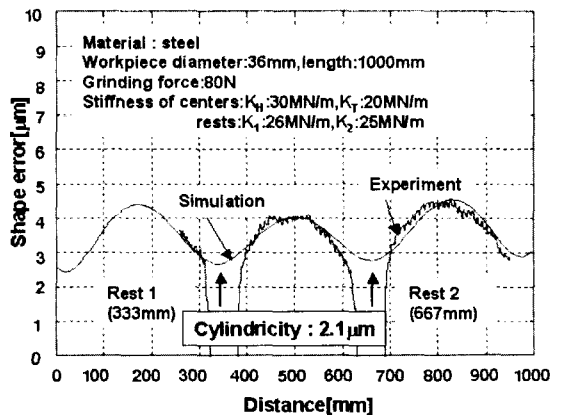


Fig. 9 Shape error of workpiece at equidistance

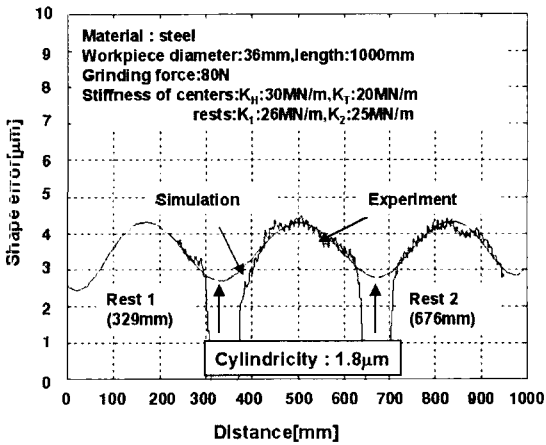


Fig. 10 Shape error of workpiece at optimum positioning

가로연삭을 행할 때의 공작물 형상에 대한 상세 모델링에 의한 형상과 연삭가공의 실험결과이다. 방진구 지지 부분에 설정한 흠 때문에 연삭력의 변화가 있어 형상이 다소 변화하고 있지만 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 이때 원통도는 $2.1 \mu\text{m}$ 이다. Fig. 10 은 Fig. 9 와 동일한 조건에서 방진구의 배치를 최적위치인 329 mm, 676 mm 로 하고 연삭했을 때의 시뮬레이션 형상과 연삭가공의 실험결과이다. 연삭가공형상이 시뮬레이션 형상과 잘 일치하고, 이때 원통도는 $1.8 \mu\text{m}$ 로서 방진구를 최적위치로 배치하였을 때의 원통도 개선효과는 1 회 연삭가공시 10% 이상 개선되었다.

5. 결론

가늘고 긴 공작물의 가로연삭에서 공작물의 원통도 형상오차는 방진구의 설치 간격, 방진구의 강성, 주축 센터 및 심압대 센터의 강성, 공작물의 크기 등에 의존한다. 방진구, 주축 센터 및 심압대 센터를 스프링으로 모델링하고 공작물을 연속보로 가정한 상세모델을 검토하여 공작물의 원통도 오차를 개선하는 각 조건에 대하여 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공작물 및 지지점의 탄성변형을 정확히 예측하여, 연삭가공후 원통도 오차의 형상을 제시하였다.
- 2) 원통도 오차를 최소화 시킬 수 있는 방진구 설치위치를 결정하기 위해서, 유전알고리즘을 사용하여 여러 조건에서의 방진구 최적설치위치를 구

하였다.

3) 실험을 통하여 방진구 최적위치에서의 원통도는 종래의 방진구 위치에 비해서 1 회 연삭에 대하여 10% 이상 개선되었고 새로 제시한 모델이 유효함을 확인하였다.

4) 아울러서 가로연삭시 방진구와 양 센터의 강성 관계는 센터의 강성이 방진구에 대해서 다소 높을 것이 요구된다.

후 기

본 연구를 위해 연삭기를 사용할 수 있도록 배려해 주신 한국기계연구원의 이용숙 박사님, 제태진 선임연구원, 실험에 도움을 주신 서산정공업 경철 사장님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Gao, Y., and Poster, K., "Computer Simulation of the Deformation of Slender, Multidiameter Rollers during Grinding," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 31, No. 1, pp. 83~93, 1991.
2. Bajpai, S. "Optimization of Workpiece Size for Turning Accurate Cylindrical Parts," *Int. J. Mach. Tools Des. Res.* Vol. 12, pp. 221~228, 1972.
3. Kounosu, K., "Characteristics of Pneumatic Workrest," *J. of JSPE*, Vol. 56, pp. 1717~1722, 1990.
4. Shiozaki, S., Nakano, Y., and Fukuda, R., "The Effect of the Elastic Deformation of Grinding Machine on the Profile Errors of Workpiece," *Trans. of JSME*, Vol. 30, No. 211, pp. 368~379, 1964.
5. Fukuda, R., and Lee, H. S., "Estimation of the Workpiece Shape Affected by the Table Motion in Cylindrical Grinding Machine," *J. of JSPE*, Vol. 54, No. 9, pp. 1697~1702, 1988.
6. Horiuchi O., and Nishimoto T., "A Force-Compensating Active Rest with Pneumatic Bellows for Precision Cylindrical Grinding," *J. of JSPE*, Vol. 54, No. 7, pp. 1304~1309, 1988.
7. Mori, K., Inoue, H., Suto, T., and Waida, T., "Development of a Non-Contacting Active Rest for Precision Cylindrical Traverse Grinding," *J. of JSPE*, Vol. 54, No. 1, pp. 82~88, 1988.
8. Henmi, N., Murata, R., and Kagami, T., "A Two

- Degree-of-Freedom Active Work-Rest Mechanism for Turning Process,” J. of JSPE, Vol. 64, No. 10, pp. 1477~1481, 1998.
9. Kassimali, A., Structural Analysis, PWS-Kent, pp. 436~497, 1993.
 10. CNC 볼스크류 연삭기 기술개발에 관한 연구, 통상산업부, 과학기술처, 1996.
 11. Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
 12. Ladd, S. R., Genetic Algorithms in C++, M & T Books, 1996.
 13. 박종권, 성활경, “유전자 알고리즘을 이용한 공작기계 구조물의 정역학적 최적 설계,” 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 2 호, pp. 66~73, 1997.
 14. Ishikawa, Y., and Aoyama, T., “Optimization of Fixturing Condition by Means of the Genetic Algorithm,” Trans. of JSME, Vol. 62, No. 598, pp. 323~330, 1996.
 15. Seo, J. R., Kim, S. M., Lee, S. K., “Machining Error Compensation of External Cylindrical Grinding Using Thermally Actuated Rest,” Proceedings of ASPE 13'th Annual Meeting, pp. 299~302, 1998.