

오비탈 연삭시스템의 연삭가공 열변형 오차 해석

Thermal Deformation Analysis of an Orbital Grinding System Grinding Process

이현민¹, 최우천^{2,✉}, 조창래³, 조순주³
Hyeon Min Lee¹, Woo Chun Choi^{2,✉}, Chang Rae Cho³, and Soon Ju Cho³

¹ 고려대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea University)

² 고려대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Korea University)

³ ㈜CESCO 연구개발부 (Department of R&D, CESCO Co. Ltd.)

✉ Corresponding author: wchoi@korea.ac.kr, Tel: +82-2-3290-3361

Manuscript received: 2015.10.31. / Revised: 2016.4.11. / Accepted: 2016.4.14.

An orbital grinding system uses a special motion to machine crankshafts in ships. When a crankshaft is operated, eccentric pins rotate and a grinding wheel moves in order to grind the pins. Thermal error caused by heat generated in the grinding process decreases the quality of the final product. In this study, the thermal error of an orbital grinding system caused by heat generation was investigated in order to predict the extent of thermal error that can occur during the grinding process. Since the machine position changes during orbital grinding, the pin part is divided into 30 degree intervals and heat is generated. Total thermal error was measured by summing the thermal errors associated with the pin and the grinding wheel. Total thermal error was found to reach a maximum at 60 degrees and a minimum at 210 degrees because of the shape of the crankshaft.

KEYWORDS: Orbital grinding (오비탈 연삭가공), Thermal error (열변위 오차), Crankshaft (크랭크샤프트)

1. 서론

연삭 가공은 주로 공작물의 기계정밀도와 표면 처리 등을 위해 생산과정에서 마지막으로 선택되는 기계가공이다. 다른 가공과정들과 달리 연삭가공은 각 재료들의 비에너지 특성에 의해 가공시 연삭숫돌을 비롯해 가공품의 극심한 온도 상승을 가져 올 수 있다. 이러한 과정에서 생기는 극심한 온도 상승은 가공품에 연소, 백색층, 퇴비빔, 잔류인장응력, 미세균열 등의 현상을 일으켜 열적손상을 준다. 열발생으로 인해 공작물에는 열적 오차

가 생기게 되며 이런 오차는 공작기계의 정밀도를 저하시키는 가장 큰 요인 중 하나가 된다. 근래 많은 연구에서 공작기계의 열적 오차를 예측하고 최소화하기 위한 다양한 시도들이 있었으며 열특성 해석을 통한 열변형 예측이 활발히 연구되어 왔다.¹

1950년 금속학계의 연구에 따르면 경화된 철의 표면에서 연삭가공시 일어나는 손상 중 대부분이 열에 의한 것임을 밝혔다. 그리고 연삭가공에 의해 생기는 온도상승과 관련하여 금속의 변형이 일어난다는 연구가 진행되었다.² 이러한 이유로 연삭

가공 중 생기는 온도변화를 측정하기 위해 열전대가 사용되었고 열전대와 방사선 센서를 이용한 온도 측정 기술들이 많이 개발 되었다.³ 극심한 온도 구배가 나타나는 측정에서는 내장된 열전대와 적외선 광섬유 센서를 이용하여 측정의 어려움을 완화하는 기술들로 이 같은 문제들이 해결되었고 측정치는 모두 일정하게 측정되었다. 하지만 온도 측정만으로는 연삭가공 중에 발생하는 열을 정확히 계산하고 제어할 수 없었다. 이를 위해서는 연삭가공 중 열특성 해석들이 진행되어야 연삭가공 온도와 그에 따른 열적 손상들을 제어할 수 있다. 연삭가공 중의 열과 관련된 문제들은 대부분 정확한 계산을 하기 어렵기 때문에 수치해석 기법을 통한 값들을 사용하게 된다. 수치해석적 기법을 이용하여 실험의 많은 시행착오를 거치지 않고도 가공물의 온도와 관련된 수치들을 예측하는 연구들이 많이 수행되어 왔다. Biermann⁴은 연삭가공 중 시간에 따른 온도의 변화를 수치해석 연구를 통하여 수행하였고, Guo와 Malkin⁵은 이를 통해 유한요소해석을 도입하여 온도분포를 구하였다. 최근에는 유한요소해석 기법이 연삭가공의 온도분포를 구하는 시뮬레이션 기법의 중요한 부분이 되었다. 연삭과정의 열해석은 보통 이동열원 이론을 바탕으로 이루어진다. 이러한 이유로 가공물의 표면을 따라 움직이는 열원을 연삭가공 부분으로 모델링한다.

연삭 에너지는 연삭숫돌이 가공물을 연삭하면서 열에너지로 모두 소비된다고 가정된다. 연삭가공에서 온도의 상승을 계산하기 위한 중요한 지수로 Energy Partition이 있다. 이것은 총 연삭에너지가 가공물의 열에너지로 변환되는 부분을 나타낸다. Energy Partition은 연삭의 종류와 공작물과 연삭숫돌의 재료에 따라 달라지며, 가공 조건에 따라 서로 달라지게 된다. 연삭가공 중 발생한 열이 공작기계에 전달되면 열전달 특성에 따라 기계의 각 부위의 온도가 상승하게 된다. 이에 따라 부품별로 열변형이 일어나면서 기계의 형상 및 구속 조건에 따라 기계 전체에 열변형 오차의 차이가 발생하게 된다. 또한 연삭가공시 발생하는 열에 의해 가공물도 열변형되어 원하는 형상에서 크게 벗어날 수 있다. 이러한 열발생으로 인해 기계의 가공 정밀도와 형상의 오차에 악영향을 줄 수 있기 때문에 연삭가공 시스템의 열적 안정성에 대한 연구가 중요하다.

본 연구에서는 오비탈 연삭시스템 공작기계의

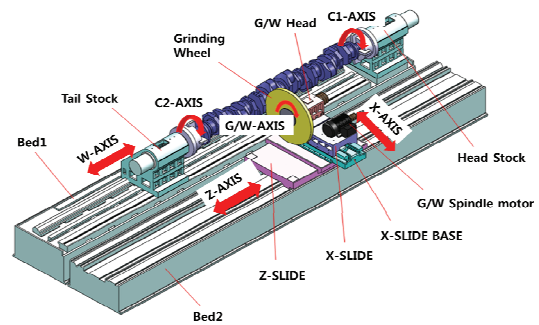


Fig. 1 Driving part of orbital grinding system

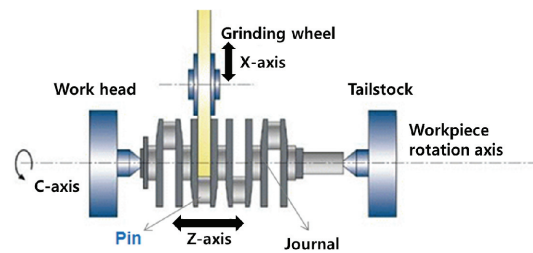


Fig. 2 Grinding of orbital grinding system

연삭과정 동안 발생하는 열에 의한 현상을 3차원 모델과 해석을 통하여 공작물에 생기는 온도분포와 열발생에 따른 열변형 오차에 대해 알아보려 한다.

2. 오비탈 연삭시스템

2.1 구동 방식

오비탈 연삭시스템은 Fig. 1과 같이 WS (Work Support)부의 Stock가 크랭크 샤프트의 저널부를 지지하면서 내부의 장치된 모터로 회전시킨다. 이때 크랭크 샤프트는 저널부의 중심축으로 회전하게 되고 핀부는 중심축과 간격을 두고 회전하게 된다. Fig. 2와 같이 GW (Grinding Wheel) 부에서는 연삭 숫돌이 z축이 고정된 채 회전하며 WS부로 이동하게 된다. 이렇게 WS부와 GW부가 구동되면서 서로 만나면 특정 궤도를 그리면서 연삭 가공이 이루어지게 된다. 연삭 숫돌과 크랭크 샤프트 모두 회전을 하며 가공이 되는 시스템이기 때문에 연삭되는 접촉부가 시간과 회전각도에 따라 계속해서 변하게 된다.

2.2 열원

일반적인 연삭시스템에서 가공시 생기는 열원

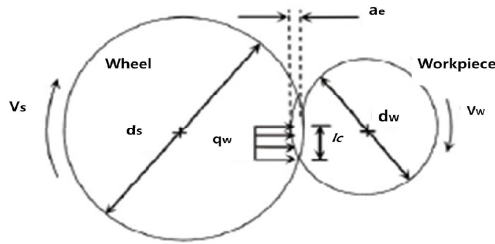


Fig. 3 Contact area in orbital grinding

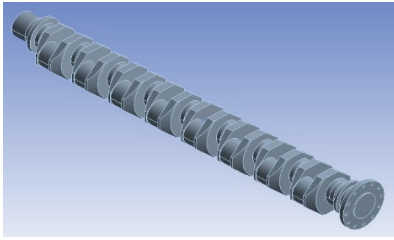


Fig. 4 5m Crank shaft

은 공작물과 연삭숫돌이 접촉되는 연삭부에서 발열이 되어 연삭이 진행되면서 열원이 직선으로 움직이게 되지만, 오비탈 연삭시스템에서의 가공시에는 가공 특성상 공작물이 회전운동을 하면서 연삭가공이 되기 때문에 연삭부 또한 공작물과 같이 회전이 되면서 열원이 회전하게 된다. 회전되는 열원의 발열을 유한요소법으로 해석하기 위해서는 해석 모델을 단순화하여 적용시켜야 한다. 그렇기 때문에 가공되는 공작물인 크랭크 샤프트의 원부분을 각도별로 나누어 시간에 따라 발열 조건을 적용한다. Fig. 3이 나타내는 것과 같이 기하학적 구조를 고려해서 접촉하는 길이를 l_c 로 나타내고 식(1)과 같이 구한다.

$$l_c = (ad_c)^{1/2} \tag{1}$$

여기서 d_c 는 등가 지름으로 식(2)와 같이 계산한다.

$$d_c = \frac{d_w d_s}{d_w \pm d_s} \tag{2}$$

여기서 d_w 와 d_s 는 각각 공작물과 연삭숫돌의 지름을 뜻한다. 원통 외부를 연삭할 때에는 분모에 플러스를 쓰고 원통 내부를 연삭할 때에는 마이너스를 사용한다. 식(1)에서는 l_c 를 크게 만드는

Table 1 Thermal property of wheel and crank shaft

	k	(pc)	(kpc)
Wheel	9.7	4.3×10^6	4.17×10^7
Crank shaft	30	3.34×10^6	1.0×10^8

Table 2 Grinding zone linear velocity

Angle (Degree)	Linear velocity (mm/s)
0	5686
30	5714
60	5716
90	5888
120	5987
150	6058
180	6084
210	6058
240	5987
270	5888
300	5716
330	5714

탄성변형을 무시한다. 이와 같이 구한 접촉부에 열원이 작용하게 되는데 열원은 식(3)과 같다.⁶

$$q_w = \frac{\epsilon u v_w a_c b}{l_c} = \frac{\epsilon u v_w a_c}{l_c} \tag{3}$$

여기서 q_w 는 연삭부에서 공작물에 가해지는 열유속을 뜻한다. 연삭에너지 중 ϵ 비율만큼의 에너지가 열에너지로 변환되어 공작물에 가해지게 된다. 에너지 파티션 ϵ 는 식(4)와 같이 구할 수 있다.⁶

$$\epsilon = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_s}{V_w}\right)^2 \left[\frac{(k\rho c)_c}{(k\rho c)_w}\right]^2} \tag{4}$$

실제 가공 중 냉각수를 사용하는 점을 고려하여 에너지 파티션을 구하는 공식으로 표면 공극에 연삭액이 모두 채워진다고 가정한다. 연삭액과 숫돌 복합체의 열적특성은 숫돌의 입자와 연삭액의 열특성의 가중평균체적으로 근사할 수 있다. 복합체의 열전도도와 체적 비열은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.⁶

$$k_c = \phi_a k_f + (1 - \phi_a) k_g \tag{5}$$

$$(pc)_c = \phi_a (pc)_f + (1 - \phi_a) (pc)_g$$

여기서 k 는 열전도도를 뜻하고, ρc 는 체적비열을 뜻한다. ϕ_a 는 슷들의 공극률을 뜻하며 밀침자 g, f 는 각각 입자와 연삭액을 말한다. 연삭가공의 냉각수평균 표면공극률 ϕ_a 는 약 87%이다. 식 (5)를 통해 공작물과 슷들의 물성치를 구하면 Table 1과 같다. 이외에도 중요한 변수 중 하나가 연삭가공을 하면서 나타나게 되는 슷들과 공작물의 간의 속도이다. 오비탈 연삭시스템 특성상 접촉부에 따라 선속도가 변하므로 이를 약 30° 간격으로 나타내었다. 선속도는 연삭되는 접촉부에 따라 달라진다. 이는 가공시 접촉되는 슷들과 크랭크 샤프트의 길이와 각도의 변화에 따라 나타낼 수 있다. 이는 Table 2에 나타내었다.

3. 연삭 공정의 열 특성 해석

3.1 모델

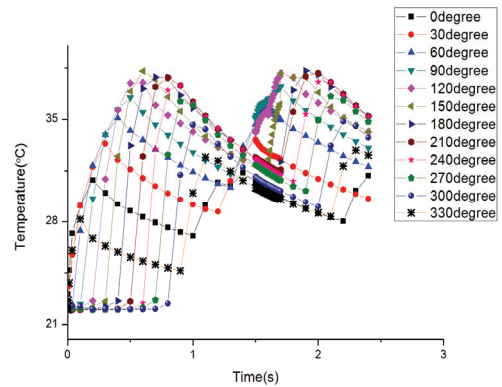
오비탈 연삭시스템은 선박용 크랭크 샤프트를 연삭하는 공작기계로 5 m 급의 크랭크 샤프트를 공작물로 하는 모델을 적용하였다. 이는 Fig. 4와 같다. 핀부의 연삭시 수시로 변하는 열원에 의해 나타나는 열특성을 해석하기 위해 핀부의 둘레를 약 30° 간격으로 각도별로 12개의 영역으로 분리하여 해석을 진행하였다. 또한 전체 오비탈 시스템의 구동부 열원에 의해 변형되는 오차를 포함하여 계산하기 위해 전체 시스템의 구동부와 이송부 같이 주요 부분만 적용시킨 단순화된 모델을 사용하였다.

3.2 해석 방법

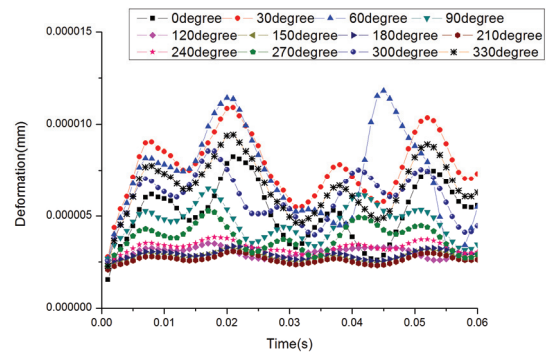
앞에서 설명한 식을 이용하여 필요한 변수값들을 구한 뒤 이를 핀부가 회전하며 연삭되는 오비탈 연삭가공의 현상에 맞게 적용하기 위해 연삭스틀이 핀부의 둘레를 따라 2바퀴 도는 가공으로 조건을 적용하였다. 또한 복잡한 오비탈 가공을 단순화하여 해석하기 위해 각 각도별로 나누어 해석하였으며, 각도별 연삭 시에는 일반 연삭과정과 같이 경계조건을 주어 열원에 의한 열전달을 간단한 해석모델의 설정을 통해 해석할 수 있었다. 열변형의 경우 열전달 해석을 통해 얻은 온도분포의 데이터를 바탕으로 FEM 해석하여 알 수 있었다.

3.3 해석 조건

오비탈 연삭가공시 연삭 슷들이 크랭크샤프트의 핀부를 2바퀴 돌아 연삭하였을 경우 전체 연삭



(a) Temperature of crank shaft



(b) Thermal deformation of crank shaft

Fig. 5 Temperature and thermal deformation of crank shaft

깊이가 모두 연삭된다고 가정하여 연삭 깊이와 열량을 조건으로 적용하여 열전달을 해석하였다. 주 위온도는 상온인 22°C로 적용하였다. 온도분포 해석을 바탕으로 실제 연삭가공시 적용되는 Stock부의 구속조건과 Workrest의 구속조건들을 적용하여 공작물의 변형을 해석하였다. 전체 오비탈 시스템의 경우에는 구동부인 이송대의 리니어 모터와 주축계의 모터에 발열량을 적용하여 열전달을 해석하였다. 위와 같이 온도 분포 해석을 바탕으로 열응력을 적용하여 열변형 해석을 하였다.

3.4 해석 결과

각 각도 별로 최대 온도분포와 열변형을 Fig. 5에 나타내었다. 공작물이 슷들에 의해 연삭가공되는 접촉부의 온도가 최대 온도로 나왔다. 핀부의 0°를 가공할 때에는 31.4°C로 최저온도가 나왔으며 180°를 가공할 때 온도가 38.3°C로 최대온도가 나

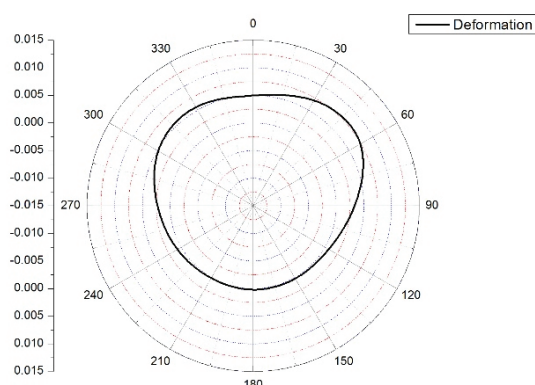


Fig. 6 Total thermal deformation of crank shaft

Table 3 Grinding zone thermal error

Angle (Degree)	Thermal error (mm)
0	0.007369
30	0.010918
60	0.011825
90	0.0064775
120	0.0035293
150	0.0032699
180	0.0033534
210	0.0030629
240	0.0038397
270	0.0052734
300	0.0085479
330	0.0094293
360	0.007369

Table 4 Temperature and thermal error of orbital system

	Temperature (°C)	Thermal error (mm)
Y axis part	33.62	0.039
X axis part	29.2	0.024
Spindle part	30.1	0.03

왔다. 열변형은 핀부의 210°에서 0.003 mm로 최소 변형이 일어났고 60°에서 0.011 mm로 최대변형이 일어났다. 이는 Table 3과 같다. 열변형은 가공되는 핀 접촉부의 반경 방향으로의 변형을 해석하여 나타내었으며 열변형오차 또한 온도분포와 같이 연삭가공 시 접촉부에서 최대로 나타났다. 최대 열변형의 경우 발열량의 최대 지점과는 다르게 60°에서 나타났다. 이는 크랭크샤프트의 형상과 관련되어 열팽창 시 각도에 따라 인장, 압축력의 비가 다르게 적용되어 나타났다. 전체 오비탈 시스템에

서의 온도분포는 Table 4와 같이 y축 이송대의 구동부에서 최대 33.6°C로 나왔으며 x축 이송대의 구동부에서는 29.2°C 주축계에서는 30.1°C로 나왔다. 시스템의 열변형으로 인해 가공부인 숫돌에 x축 방향으로 생기는 오차는 최대 0.002 mm로 나왔다. 숫돌의 오차만큼 변형오차가 더해져 최종 오비탈 시스템의 열변형 오차를 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다. 열변형으로 최대 0.009 mm의 오차가 생겼고 최소 0.0006 mm의 오차가 생겼다.

4. 결론

오비탈 연삭가공 시스템의 선박용 크랭크 샤프트의 핀부 연삭가공 시 일어나는 특수한 상황에 대해 구속조건을 변경하며 가공 시 생기는 열원이 공작물의 온도와 열변형 오차에 미치는 영향을 알아 보았다. 또한 전체 오비탈 시스템 구동부의 열발생에 따른 열변형도 알아보았다. 해석을 통해 시스템의 거동을 살펴본 결과 다음과 같았다.

(1) 가공이 되는 숫돌과 공작물 접촉부의 선속도에 비례해서 열발생량이 달라진다. 선속도는 핀부의 위치가 0°에 해당할 때 가장 작았으며 180°에 해당할 때 가장 커지게 되었다. 각각의 경우 열발생량도 최소, 최대가 되었다.

(2) 최대 열변형은 핀부의 60° 구간에서 일어났고 210° 구간에서 최소 열변형이 나타났다.

(3) 전체 오비탈 시스템에서는 y축 이송대의 모터 발열량이 최대로 열변형 또한 최대로 나타났다.

(4) 두 가지 열변형을 합산하였을 때 가공 시 최대로 일어나는 열변형은 0.014 mm 최소 0.005 mm로 핀부의 각도에 따라 변화가 다소 크게 나타났다. 핀부의 가공 시 접촉부의 열발생량이 최대인 180°과 최소인 0°에서 열변형이 최대, 최소가 아닌 60°와 210°에서 발생하는 원인은 열팽창이 크랭크샤프트의 형상과 가공방향과 관련되어 60° 구간에서는 인장력이 210° 구간에서는 압축력이 더 크게 발생되어 나타났다. 향후 오비탈 연삭가공의 특수한 거동으로 적용되는 열량의 변화에 대해 냉각수의 조건에 따른 열변형 해석을 수행하여 개선하고자 한다.

후 기

본 연구는 ㈜세스코와 NRF의 BK21 plus 프로그램을 통해 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

1. Mao, C., Zhou, Z., Ren, Y., and Zhang, B., "Analysis and Fem Simulation of Temperature Field in Wet Surface Grinding," *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, No. 6, pp. 399-406, 2010.
2. Littmann, W. E., "The Influence of the Grinding Process on the Structure of Hardened Steels," Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Metallurgy, Vita. Bibliography, pp. 70-72, 1954.
3. Ueda, T., Hosokawa, A., and Yamamoto, A., "Studies on Temperature of Abrasive Grains in Grinding-Application of Infrared Radiation Pyrometer," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 107, No. 2, pp. 127-133, 1985.
4. Biermann, D. and Schneider, M., "Modeling and Simulation of Workpiece Temperature in Grinding by Finite Element Analysis," *Machining Science and Technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 173-183, 1997.
5. Guo, C. and Malkin, S., "Analysis of Transient Temperature in Grinding," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 117, No. 4, pp. 571-577, 1995.
6. Malkin, S., Guo, C., and Malkin, S., "Thermal Analysis of Grinding," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 56, No. 2, pp. 760-782, 2007.