

나노유체를 이용한 메소스케일 밀링 가공 특성에 관한 실험적 연구[§]

이필호* · 남택수* · Chengjun Li* · 이상원*[†]

*성균관대학교 기계공학부

Experimental Study on Meso-Scale Milling Process Using Nanofluid Minimum Quantity Lubrication

P. H. Lee*, T. S. Nam*, C. Li* and S.W. Lee*[†]

* School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.

(Received May 13, 2010 ; Revised July 16, 2010 ; Accepted July 21, 2010)

Key Words: Meso-Scale Machine Tool(메소스케일 공작기계), Meso-Scale Milling(메소스케일 밀링), Compressed Cold Air(압축냉각공기), Nanofluid(나노유체), Minimum Quantity Lubrication (극소량 절삭유 윤활)

초록: 본 논문에서는 압축냉각공기, MQL 및 MoS₂ 나노유체 MQL 을 적용한 메소스케일 밀링의 가공 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 마이크로/메소 밀링 가공 실험 수행을 위하여 BLDC 스피들과 DC 모터 슬라이드를 장착한 데스크톱 크기의 3 자유도 메소 스케일 기계가공 시스템을 구현하였고, 가공 시편의 표면거칠기 측정 및 분석을 통해 가공성능 평가를 수행하였다. 실험을 통해 압축냉각공기, MQL 및 MoS₂ 나노유체 MQL 을 사용한 경우 건식가공에 비하여 표면거칠기가 향상되는 것을 발견하였으며 특히 MoS₂ 나노유체 MQL 과 압축냉각공기를 동시에 적용하였을 경우의 가공 표면거칠기가 가장 우수함을 확인하였다.

Abstract: This paper present the characteristics of micro- and meso-scale milling processes in which compressed cold air, minimum quantity lubrication (MQL) and MoS₂ nanofluid MQL are used. For process characterization, the micro- and meso-scale milling experiments are conducted using desktop meso-scale machine tool system and the surface roughness is measured. The experimental results show that the use of compressed chilly air and nanofluid MQL in the micro- and meso-scale milling processes is effective in improving the surface finish.

1. 서 론

최근 세계는 현대 산업사회의 급속한 발전으로 인해 야기된 환경오염 및 지구 온난화 등의 문제를 해결하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 경향으로 인해 최근 산업현장에서는 친환경 생산기술 (Green manufacturing) 개발이 중요하고 시급한 문제로 대두되고 있다.

국내의 친환경 생산기술의 경우 주로 사후처리 기술개발에 초점이 맞추어져 왔으며, 관련 기술지원은 선진국에 비해 약 20~30% 정도 크게 뒤쳐져 있는 실정이다.⁽¹⁾ 최근 선진국의 환경보호 정책인 그린라운드(Green Round)나 ISO 14000 에서

작업환경에 대한 규제가 더욱 강화되는 현재 상황에서 친환경 생산기술의 개발은 대외 경쟁력 확보를 위해 반드시 고려되어야 한다.

기존의 생산 가공 시 발생하는 환경오염 물질에는 폐공구, 절삭유, 칩 등이 있다. 이 중 절삭유는 냉각 작용, 윤활 작용, 칩 배출, 부식방지 등의 목적으로 사용되며, 생산의 고정도화 및 생산성 향상에 큰 역할을 하므로 대부분의 절삭 및 연삭 가공에서 사용되고 있다. 그러나, 절삭유는 환경 뿐만 아니라 인체의 건강에도 큰 영향을 미치고 있다. Fig. 1 은 절삭유가 작업자의 인체에 미치는 영향을 도식적으로 보여주고 있다. Calvert 등⁽²⁾의 연구에 의하면 절삭유가 작업자에게 미칠 수 있는 가장 큰 건강 상의 문제는 체장, 피부, 담낭, 방광, 소화기계 등 인체의 여러 조직에서 암을 유발할 수 있다는 것이며 또한, 절삭유는 각종 호흡기 질환과 피부 질환을 초래한다고 알려져 있다.

§ 이 논문은 2010 년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2010. 4. 22.-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임.

† Corresponding Author, sangwonl@skku.edu

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

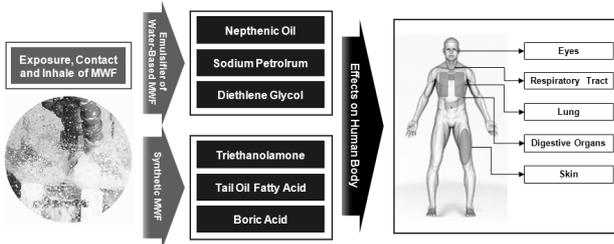


Fig. 1 Effects of cutting fluid on human health

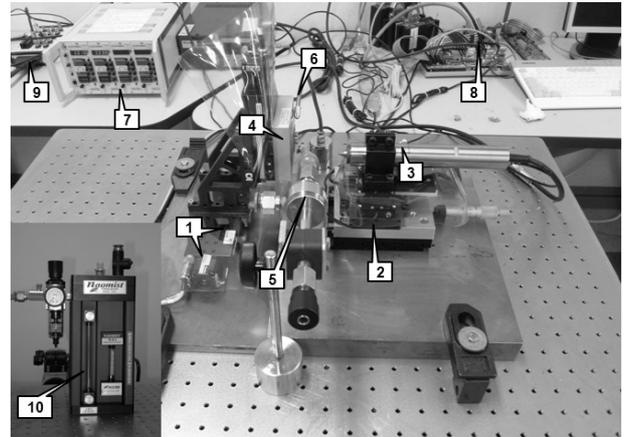
절삭유 사용은 작업자의 건강뿐 아니라 비용적 문제를 발생시킨다. Klocke 와 Eisenblatter⁽³⁾은 절삭유 관련 처리 비용이 총 생산 비용의 7~17%를 차지하며, 공구비용에 비해 4 배 이상에 해당한다는 통계를 발표하였다

이러한 절삭유가 야기하는 인체의 건강, 환경오염 및 비용적 문제를 최소화하기 위하여 다양한 친환경 가공 기술이 연구되고 있으며 이 중에서도 극소량의 절삭유를 분무하는 극소량 절삭유 윤활(Minimum Quantity Lubrication, MQL) 가공과 관련된 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

Tasdelen 등⁽⁴⁾은 MQL 을 적용한 절삭가공의 경우, 전자주사현미경(SEM)과 광학현미경(Optical microscopy) 등을 이용하여 공구와 칩의 접촉지점의 형태를 파악하였으며 이를 건식 가공과 비교하였다. Lee 등⁽⁵⁾은 MQL 기반 밀링가공 연구에서 반응표면분석을 통해 MQL 밀링가공의 회귀함수를 도출하고 만족도 함수를 개발하여 최적의 절삭조건 도출하고 이를 실험적으로 검증하였다. 이처럼 MQL 가공기술과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있지만 가공물의 열적 팽창이나 공구마모, 윤활성능의 보장에 있어 기존 습식가공에 비하여 미흡한 문제를 보이고 있다.

최근 이러한 MQL 가공기술의 성능적 제약을 극복하기 위하여 나노유체(Nanofluid)를 적용한 MQL 가공기술이 제안되고 있다. 나노유체란 절삭유체의 열전달 및 윤활 특성을 증가시키기 위해 수 나노에서 수백 나노 크기를 갖는 MoS₂, 나노튜브(CNT), 풀러렌(C60) 등의 나노입자를 안정적으로 분산시킨 유체를 의미한다. 이러한 나노유체를 가공부에 분무함으로써 기존 MQL 가공의 친환경 효과를 유지함과 동시에 윤활 및 열전달 특성의 향상 등을 기대할 수 있으며 이는 가공 성능의 향상으로 연계된다.

Shen 등^(6,7)은 연삭가공에 있어 습식가공, 일반적인 MQL 가공 및 다양한 나노입자와 친환경성 절삭유의 조합을 통한 나노유체 MQL 가공 실험을 수행하여 절삭력, 공구마모, 표면 거칠기 및 절삭온도를 비교하여 각 가공 성능을 비교 분석하였다. Srokant 등⁽⁸⁾은 나노



Legend

- 1. Linear Slides 2. PZT Slide 3. Grinding Spindle 4. 2-Axis Load Cell 5. Vortex Tube
- 6. MQL Nozzle 7. Strain Amplifier 8. PMAC Controller 9. DAQ 10. MQL system

Fig. 2 Experimental setup

유체를 이용한 절삭가공에 관한 연구에 있어서 유한요소해석 및 실험을 통해 나노유체의 열 전달 특성을 분석하였다. Sridharan 과 Malkin⁽⁹⁾은 CNT 및 MoS₂ 나노입자와 에스테르 오일에 혼합한 나노유체의 열적 특성을 확인하였다.

상기한 연구들은 나노유체를 이용한 MQL 가공기술의 가능성을 탐구하는 초보적인 연구로서 특히 실험연구의 경우 주로 일반 대형 공작기계가 사용되었다. 그러나 대형 공작기계의 경우, 에너지 소비, 제조, 관리 및 유지 보수비용의 증가 등 환경 및 경제적 측면에서의 문제점을 가지고 있다. 따라서 미세 형상을 가공하는 마이크로/메소 기계가공의 경우 초소형 메소 스케일 공작기계 기술을 도입하여 나노유체 MQL 가공을 수행한다면 환경 친화성 및 경제성의 극대화를 달성할 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 데스크톱 크기의 메소 스케일 기계가공 시스템을 구현하여 압축냉각공기, MQL 및 MoS₂ 나노유체 MQL 을 적용한 마이크로/메소 밀링가공 실험을 수행하고 측정된 표면거칠기 비교를 통한 가공 특성 분석을 수행하였다. 또한, 유체 MQL 가공을 위한 MoS₂ 나노입자의 제작 및 물리적 특성에 관한 고찰도 수행하였다.

2. MQL 마이크로/메소 밀링가공 특성분석

2.1 실험 장치 구성

MQL 기반 기계 가공특성을 규명하기 위해 건식, 압축냉각공기 및 MQL 마이크로 밀링 가공 실험을 수행하였다. Fig 2 는 구현된 데스크톱 크기

Table 1 Experimental scheme

| Run | MQL Spray | Compressed Chilly Air |
|-----|-----------|-----------------------|
| 1 | No | No |
| 2 | No | -20°C |
| 3 | 20 cc/hr | No |
| 4 | 20 cc/hr | -20°C |

의 메소 스케일 MQL 기계가공 시스템 실험장치로서 전체크기는 210 x 190 x 220 mm 이다. Fig. 2 에서 알 수 있듯이 공작물의 가공을 위해 최대 80,000RPM 의 회전속도를 갖는 BLDC 전기 스피들 (E-800Z)을 사용하였고, 공작물 및 공구의 이송장치로는 DC 선형 슬라이드(MX80S) 와 PZT 선형 슬라이드 (AID45000E)를 사용하였으며, 제어장치로는 PMAC 컨트롤러를 사용하였다.

본 실험에 적용된 MQL 분무 장비(CF01)는 유량 2-20 cc/hr 의 성능 범위를 가지고 있으며, 압축냉각공기의 공급을 위하여 볼텍스 튜브 (SMVT 10008)를 사용하였다. 본 장비는 최저온도 -30°C 의 압축냉각공기를 분사할 수 있다.

2.2 실험 설계

마이크로 밀링 가공 실험을 통한 성능평가를 위해 Table 1 에 정리되어 있는 것과 같이 MQL 절삭유체와 압축공기가 분사되는 4 가지 실험을 설계하였다. 본 실험 연구에서는 MQL 뿐만 아니라 압축냉각공기의 운할 및 냉각 효과도 함께 검토 하였다.

실험에서 고려된 독립변수는 압축공기온도와 MQL 의 적용 여부이며, 관측인자는 표면 거칠기이다. 본 실험 설계는 다음과 같이 Table 1 에 주어져 있다.

실험에 사용된 시편은 SK-41C 강이며 밀링 공구는 직경 1.0mm 를 갖는 초경재질의 티타늄 코팅 엔드밀 공구를 사용 하였다. BLDC 전기 스피들의 회전속도는 7,000 RPM, 공구의 이송속도는 80 mm/min 로 고정하였다. 압축냉각공기의 유량은 45.2 l/min 이며, MQL 유체의 분무량 20 cc/hr 이다. 마이크로 밀링 가공 실험을 구현하기 위해 상향절삭(Up-milling) 방법을 적용하였으며 공구 이송방향의 좌측에서 압축냉각공기가, 우측에서 파라핀오일 MQL 유체가, 분사되도록 실험장치를 구성하였다. 다음 Table 2 는 상기한 구체적인 실험 조건을 나타내고 있다.

Table 2 Experimental conditions

| | |
|----------------|---|
| Milling Tool | Carbide tool coated by tungsten End mill $\Phi=1.0$ mm |
| Workpiece | SK-41C |
| Milling Passes | 2 |
| Spindle Speed | 7,000 RPM |
| Air Flow Rate | 45.2 l/min |

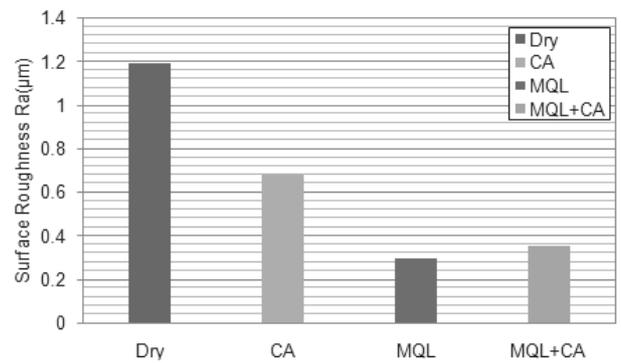


Fig.3 Measured surface roughness R_a

2.3 실험 결과

본 실험을 수행한 후 표면조도 측정장비를 사용하여 밀링 가공면 표면거칠기(R_a)를 측정하였다. Fig. 3 은 R_a 측정결과를 보여주고 있다.

Fig. 3 에서 알 수 있듯이 건식 밀링 가공의 경우 표면거칠기가 가장 좋지 않으며, 일반 MQL 밀링 가공면의 표면거칠기가 가장 우수하다. 압축냉각공기를 적용한 경우, 건식 가공의 경우보다는 우수하나 일반 MQL 가공의 경우보다 표면거칠기가 상대적으로 좋지 않다. 이는 압축냉각공기에 의한 운할효과가 MQL 에 비하여 상대적으로 미약하여 냉각효과만이 작용한 것으로 추정된다. MQL 과 압축냉각공기를 동시에 적용시킨 경우 표면거칠기 측정 결과는 일반 MQL 가공보다 좋지 않은 것으로 나타났는데 이는 밀링 가공 실험 시 압축냉각공기와 MQL 을 동시에 적용하는 경우, 각각의 압력의 차이로 인하여 MQL 의 분사 지점의 정확성이 상대적으로 낮아진 것으로 예상된다.

3. MoS₂ 나노유체 제작

3.1 나노유체 제작 재료 및 장비

본 실험에 적용된 나노유체는 MoS₂ 입자를

이용하여 제작되었다. MoS₂ 분자는 육방 최밀격자 구조를 갖고 있으며 입자들이 여러 층의 얇고 평평한 판으로 겹쳐져 있는 형태를 가지고 있다. 이러한 독특한 구조로 인하여 MoS₂ 입자는 재료에 큰 하중이 발생하더라도 전단방향의 응력을 크게 감소시켜 윤활특성을 강화시킨다.⁽¹⁰⁾

MoS₂ 분말(크기 3-5 μm)을 나노크기의 입자로 분쇄하기 위하여 볼밀링 장비(Pulveristte 7)를 사용하였다. 볼밀링 가공 시 입자에 충격을 주기 위한 재료로 열경화된 강구가 사용되었다. 습식 볼밀링 작업을 위하여 카놀라유와 유화제로는 레시틴이 사용되었다. MQL 절삭유로는 파라핀 오일이 사용되었다. 그리고 초음파 발생장비를 이용하여 나노유체의 혼합에 사용하였다.

3.2 나노유체의 제작

MoS₂ 입자를 이용한 나노유체 제작 과정은 Fig. 4 에 도식적으로 나타나 있다. 우선 분쇄되지 않은 7g 의 MoS₂ 분말과 15g 열경화 강구를 사용하여 800RPM 의 조건에서 건식 볼밀링을 수행하였다. 이때 30 분 가동 및 15 분 휴지조건으로 72 시간 동안 본 작업을 수행하였다.

이후 분쇄된 MoS₂ 입자에 카놀라유를 첨가하여 상기한 건식 볼밀링과 동일한 구동조건에서 습식 볼밀링 작업을 수행하였다. 습식 볼밀링으로 만들어진 나노입자 반죽덩어리에 레시틴을 첨가하여 초음파 발생 장치에서 4 시간 동안 혼합을 수행하였다. 마지막으로 레시틴 혼합액에 파라핀유를 첨가하여 MoS₂ 나노유체를 완성하였다. 분쇄 전 MoS₂ 입자, 건식 볼밀링 및 습식 볼밀링 후 나노입자의 전자현미경 사진이 Fig. 5 에 보여지고 있다. Fig. 5(a)의 볼밀링 전 초기입자보다 Fig. 5(b)의 건식 볼밀링 후 MoS₂ 입자가 현저히 작아지는 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 5(c)와 같이 습식 밀링을 할 경우 건식밀링의 입자보다 입자들의 균일도가 더 높아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6 은 MoS₂ 나노입자의 형상을 자세히 관찰한 사진으로 전자주사현미경을 이용하여 50,000 배로 확대되었다. Fig. 6(b)의 습식 볼밀링의 나노입자의 경우 입자가 200~300nm 정도로 비교적 균일하게 구성되며 Fig. 6(a)의 건식볼밀링 입자에 비해 상대적으로 완만한 외형을 보이고 있다.

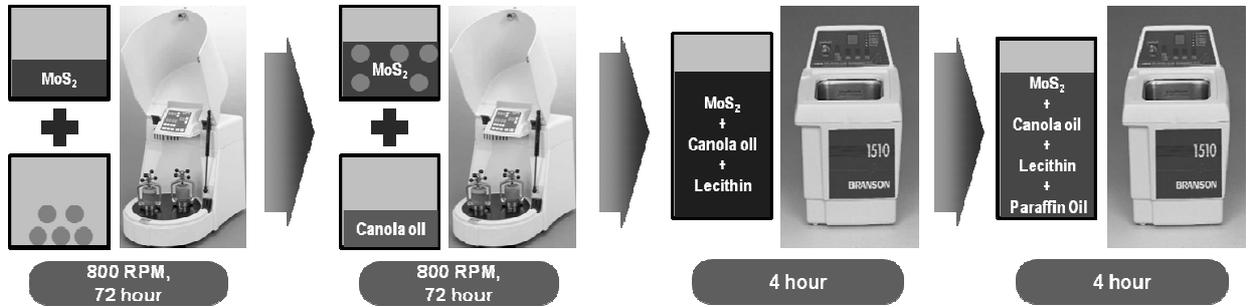
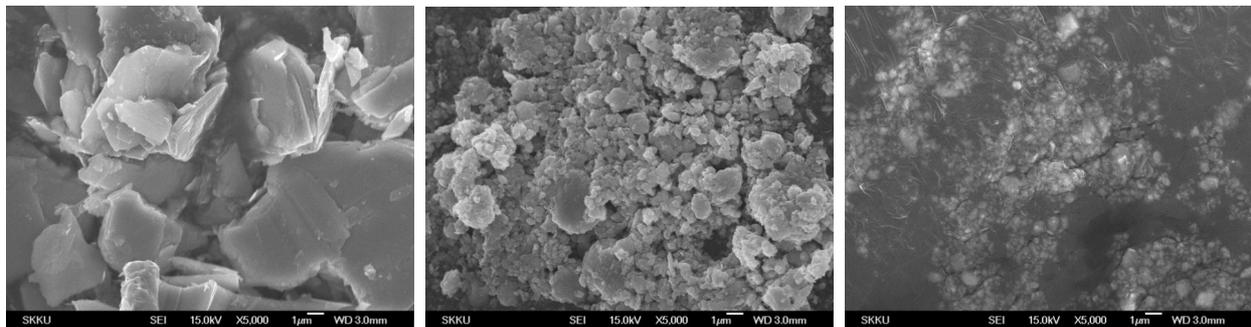


Fig.4 Process of nanofluid fabrication



(a) Before Milling

(b) Dry Milled

(c) Wet Milled

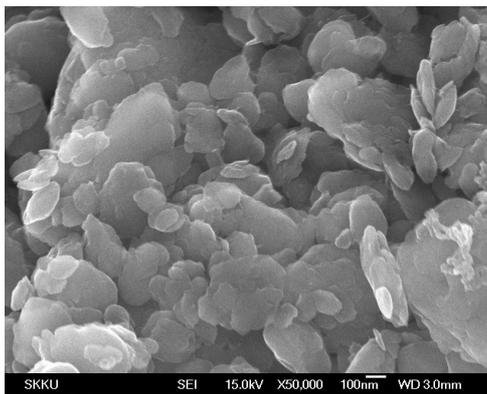
Fig. 5 Pulverization Process of MoS₂ Powder (x 5,000)

Table 3 Experimental conditions

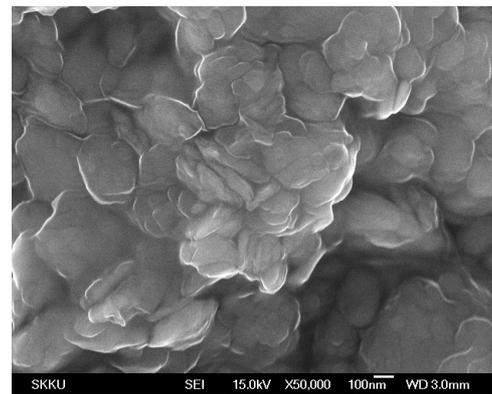
| | |
|----------------|---|
| Milling Tool | Carbide tool coated by tungsten End mill $\Phi=0.5\text{mm}$ |
| Workpiece | SK-41C |
| Milling Passes | 4 |
| Spindle Speed | 20,000 RPM |
| Air Flow Rate | 45.2 l/min |

Table 4 Experimental scheme

| Run | MQL spray | Compressed Chilly Air |
|-----|------------------------|-----------------------|
| 1 | No | No |
| 2 | No | -20°C, Chilly Air |
| 3 | Paraffin Oil, 20 cc/hr | No |
| 4 | Nanofluid, 20 cc/hr | No |
| 5 | Paraffin Oil, 20 cc/hr | -20°C, Chilly Air |
| 6 | Nanofluid, 20 cc/hr | -20°C, Chilly Air |



(a) Dry Milled



(b) Wet Milled

Fig. 6 SEM images of MoS₂ nano particles (x 50,000)

4. MoS₂ 나노유체 MQL 밀링가공 특성분석

4.1 실험 장치 및 실험 설계

Fig. 2 에 주어진 메소 스케일 기계가공 시스템에서 MoS₂ 나노유체 MQL 을 적용한 마이크로 밀링가공 실험을 수행하였으며, 가공 조건으로는 건식, 일반 MQL, 나노유체 MQL 및 압축 냉각공기가 고려되었다. 일반 MQL 의 경우 파라핀유를 사용하였고, 나노유체 MQL 의 경우 3.2 절에서 제작된 MoS₂ 나노유체를 사용하였다.

본 실험은 초경재질의 텅스텐 코팅 엔드밀 공구를 사용하였고, 공구의 지름은 500 μm 이다. 실험용 시편은 SK-41C 강을 사용하였다. Table 3 은 구체적인 실험조건을 기술하고 있다.

일반 MQL, 나노유체 MQL 각각의 유량은 10 cc/hr, 스피들 속도는 20,000 RPM, 이송률은 80 mm/min, 절삭 깊이는 20 μm 으로 고정되었다. 절삭 길이는 1 회 가공당 20 mm 로 설정하였으며, 각각의 실험당 총 4 번의 마이크로 밀링 가공이 수행되었다.

본 실험은 Table 4 와 같이 압축공기의 유무와 MQL 공급 유무 및 분무 유체의 종류에 따라 설계되었다. 실험의 관측인자는 표면 거칠기이다.

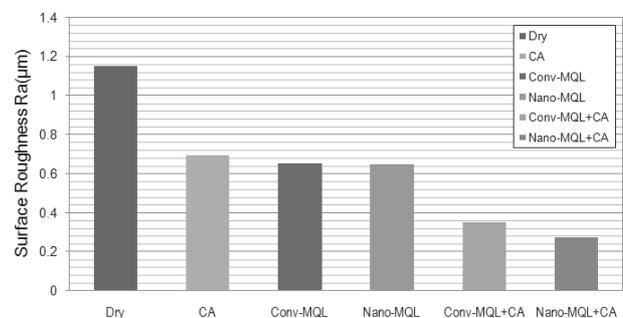


Fig.7 Measured surface roughness R_a

4.2 실험 결과

서로 상이하게 설계된 6 가지 실험의 수행 후 각각 시편의 표면거칠기(R_a)를 측정하였으며 Fig. 7 에 표면거칠기의 측정결과가 주어져 있다. Fig. 7 에서 알 수 있듯이 건식 가공보다 압축냉각공기, 일반 MQL 및 나노유체 MQL 을 적용시킨 밀링 가공의 경우 상대적으로 표면거칠기가 더 우수한 것으로 확인되었다.

또한, 압축냉각공기를 일반 MQL 및 MoS₂ 나노유체 MQL 과 동시에 적용시키면 더 좋은 표면거칠기 결과를 얻을 수 있었다. 특히, Fig. 7 에서 알 수 있듯이 압축냉각공기와 MoS₂ 나노유체 MQL 을 동시에 적용한 경우, 측정된 가공 표면거칠기가 가장

우수하여, 나노유체의 적용을 통한 표면거칠기 향상 효과를 확인할 수 있다. 이는 2.3 절의 실험결과와는 다른 경향을 보이는데 분사유체의 압력 및 유량차이를 고려하여 절삭유체 분무유량 및 분사위치의 적절한 변경 등의 실험조건 개선으로 나노유체와 압축냉각 공기가 가공부위에 보다 정확히 혼합분사 되었으며 이로 인하여 나노유체의 효과를 배가된 것으로 분석된다.

본 실험의 각 실험당 가공횟수가 4 번으로 제한적이었기 때문에 많은 가공이 수행될 경우 이러한 경향성이 더욱 강하게 나타날 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 MQL 기계가공의 성능적 한계를 극복하고자 MoS₂ 나노유체 MQL 을 적용한 마이크로 밀링가공 특성에 관한 실험적 분석을 수행하였다. 즉, 가공성능의 극대화를 위해 데스크톱 크기의 메소 스케일 기계가공 시스템을 구현하여 MQL 과 압축냉각공기를 사용한 마이크로 밀링가공 기초 실험, MoS₂ 나노유체제작 및 MoS₂ 나노유체를 이용한 MQL 마이크로 밀링가공 실험이 수행되었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마이크로 밀링가공 기초 실험을 통하여 MQL 및 압축냉각공기의 적용에 의한 시편의 표면거칠기 향상을 확인하였다.

(2) MoS₂ 입자를 이용한 나노유체 제작이 수행되었다. MoS₂ 입자의 볼밀링 및 초음파 혼합과정을 통해 나노입자가 제조되었으며 전자현미경 사진촬영을 통하여 입자의 크기가 50nm 와 500nm 사이인 것을 확인하였다.

(3) 제작된 MoS₂ 나노유체를 적용한 MQL 마이크로 밀링가공 실험이 수행되었으며, 나노유체 MQL 과 압축냉각 공기가 동시에 적용된 마이크로 밀링가공의 경우 표면거칠기 향상효과가 가장 큰 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구 일반연구자 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0076115).

참고문헌

- (1) Kang, J. H., Lee, H. Y., Lee, S. W. and Lim, S. J., 2008, "State of the Art in Environmental Friendly Manufacturing Technology," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 2, pp. 32~39.
- (2) Calvert, G. M., Ward, E., Schnorr, T. M. and Fine, L. J., 1998, "Cancer Risks Among Workers Exposed to Metalworking Fluids: A Systematic Review," *American Journal of Industrial Medicine*, Vol. 33, No. 2, pp. 282~292.
- (3) Klocke, F. and Eisenblatter, G., "Dry Cutting, 1997, Keynote Papers," *Annals of CIRP*, Vol. 46, No. 2, pp. 519~526.
- (4) Tasdelen, B., Thordenberg H. and Olofsson D., 2008, "An Experimental Investigation on Contact Length During Minimum Quantity Lubrication (MQL) Machining," *Journal of Materials processing Technology*, Vol. 203, No. 1~3, pp. 221~231.
- (5) Lee, J. H., Ko, T. J. and Baek, D. G., 2009, "A Study on Optimal Cutting Conditions of MQL Milling Using Response Surface Analysis," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 43~50.
- (6) Shen, B., Malshe, A. P., Kalita, P. and Shih, A. J., 2008, "Performance of Novel MoS₂ Nanoparticles Based Grinding Fluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 36, pp. 357~364.
- (7) Shen, B., Shih, A. J. and Simon, C. T., 2008, "Application of Nanofluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding," *Tribology Transactions*, Vol. 51, No. 6, pp. 730~737.
- (8) Srikant, R. R., Rao, D. N., Subrahmanyam, M. S. and Krishna, P. V., 2008, "Applicability of Cutting Fluids with Nanoparticle Inclusion as Coolants in Machining," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, Vol. 222, No. 2, pp. 221~225.
- (9) Sridharan, U. and Malkin, S., 2009, "Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) with Nanofluids on Grinding Behavior and Thermal Distortion," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 37, pp. 629~636.
- (10) Shankara, A., Menezes, Pradeep L., Simha, K. R. Y. and Kailas, Satish V., 2008, "Study of Solid Lubrication with MoS₂ Coating in the Presence of Additives Using Reciprocating Ball-on-Flat Scratch Tester," *Sadhana*, Vol 33, No 3, pp. 207~220.