

환경 친화적 기계가공 기술에 관한 연구 연삭공정에서의 절삭유 미립화와 환경영향(I)

황 준*, 정의식#

A Study on the Environmentally Conscious Machining Technology Cutting Fluid Atomization and Environmental Impact in Grinding Operation (I)

Joon Hwang*, Eui-Sik Chung #

ABSTRACT

This paper presents the experimental results to analyze the atomization characteristics and environmental impact of cutting fluid in grinding process. Grinding is a major machining process to improve surface quality with different machining mechanism which is compared with turning or milling process. The environmental impact due to aerosol generation via grinding process is a major concern associated with environmental consciousness. Experimental results show that the generated fine aerosol which particle size less than 10 micron appears near working zone under given operational conditions. The aerosol concentration is much higher enough to affect human health risk with its generated aerosol quantities. This study can be provided a basic knowledge for further research of environmental consciousness machining development.

Key Words : Environmentally Conscious Machining(환경친화적 기계가공), Grinding Process(연삭가공공정), Cutting Fluid(절삭유), Atomization(미립화), Environmental Impact(환경영향)

1. 서론

최근, 야기되고 있는 환경문제에 대해 국내외적으로 환경은 물론, 위생 및 안전에 대한 관심과 규제가 심화되면서, 생산제조 단계에서부터 가공폐기물 및 인체 유해 물질의 발생을 억제하거나 극소화 하기 위한 예방기술 차원의 공정 및 제조방법 (PPMs : Process and Production Methods) 개발이 시급히 요청되고 있다.

특히, 기계가공공정에 폭넓게 적용되고 있는 연삭가공 공정은 제품 및 금형가공공정의 마무리 공정으로서 표면조도 향상을 통한 수명증대와 고품위 가공실현에 많은 기여를 하고 있다. 특히, 다양한 형태와 재질을 갖는 연삭숫돌의 고속회전을 통한 고속가공에 의해 높은 정밀도를 얻을 수 있다. 한편, 연삭가공은 높은 회전수를 갖는 연삭숫돌에 의한 연삭가공시 미립자 형태의 분진과 절삭유 미립자인 오일-미스트가 많이 발생되어 작업환경을

* 접수일: 2004년 10월 12일; 게재승인일: 2005년 4월 15일

* 충주대학교 기계설계학과

교신저자: 한밭대학교 기계설계공학과

E-mail: eschung@hanbat.ac.kr, Tel: (042) 821-1158

크게 악화시키고 있어 이에 대한 적절한 대책이 시급히 요망되고 있다.¹

따라서, 본 연구에서는 연삭가공공정에서 작업장내 대기오염과 밀접한 관련이 있으며, 작업자의 호흡기 질환 및 피부질환 발생을 유발시켜 작업자의 안전에 영향을 미치면서도 그 제어가 가장 어려운 미립자(aerosol) 형태의 입자상 물질(particulated matter)을 발생시키는 미립자의 거동특성을 분석하기 위한 정밀측정실험을 실시하였다. 이러한 접근은 절삭유 미립화 현상에 의한 환경, 위생, 안전(EHS, Environment, Health & Safety) 측면의 폐해정도를 정확히 인식할 수 있게 하여 보다 과학적이고 근원적인 대책수립에 적용될 수 있으며, 이것이 진정한 의미의 환경 친화적, 인간 친화적 생산시스템 구축이라 사료된다.

2. 절삭유 미립화 메카니즘

기계가공 품질 및 생산성 측면에서 폭넓게 사용되고 있는 절삭유는 공작기계의 운동 메카니즘에 의해 매우 복잡한 형태의 미립자 발생을 야기시킨다. 최근, 선진국에서는 작업장내 대기환경 영향을 평가하기 위한 양적인 지표로서 공기 중의 미립자 크기와 농도를 사용하며, 미국 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서 공기 중 금속작업유의 허용노출 농도를 0.5 mg/m^3 로 제한하기 시작했다.²

절삭유 미립자 발생과정에 대한 이해를 도모하기 위하여, 본 연구에서는 유체 미립화 이론(fluid atomization theory)과 실험적 측정을 바탕으로 연삭공정에서 절삭유 사용에 따른 절삭유 미립자 입경과 농도를 정량화하기 위한 물리적 모델을 제시하고자 한다.

Fig. 1 에 나타낸 바와 같이, 절삭유 미립화 기구는 크게 3가지 메카니즘으로 구성된다.^{4,5} 회전분리기구(spin-off mechanism)는 연삭숫돌의 회전운동에 의한 원심력에 의해 숫돌표면상의 절삭유가 반경방향으로 튕겨나가면서 미립화되는 현상을 의미한다. 또한, 충돌분산기구(splash mechanism)는 공구나 공작물에 절삭유 충돌로 인한 운동량 전달로 일어나며, 증발기구(evaporation mechanism)는 절삭점 부근의 높은 온도에 의해 접촉된 절삭유가 증기상태로 되는 것을 말한다.

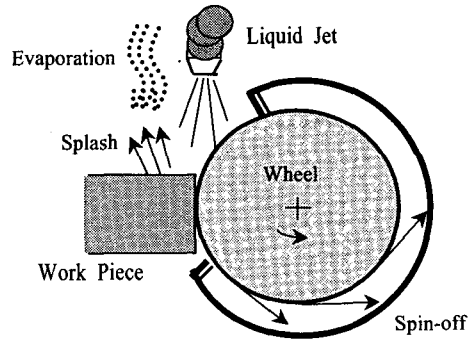


Fig. 1 Aerosol generation of cutting fluids in grinding process

특히, 연삭숫돌 상에 존재하는 기공(void)에 스며든 절삭유는 연삭숫돌의 고속회전에 의해 다시 외부로 분출되면서, 매우 작은 미립자로 분리될 수 있어 선삭가공(turning)과 비교해 볼 때, 더 미세한 절삭유 미립자가 생성될 수 있다.

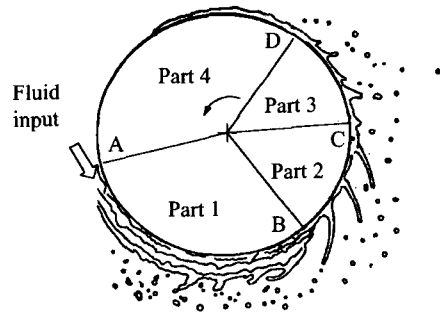


Fig. 2 Rotary disk atomization process and three formation modes

연삭숫돌의 고속회전에 의한 절삭유의 회전분리 미립화 현상은 Fig.2와 같이 묘사할 수 있으며, 유속 및 유량에 따라 유막형성모드(film formation mode), 물줄기 형성모드(ligament formation mode), 물방울형성 모드(drop formation mode)의 3가지 미립화 형태를 갖는다.³

Fig. 2 에는 "A"점으로 공급된 절삭유가 숫돌 주변에 어떻게 유막을 형성하는지를 보여주고 있다. 유속이 높은 "I"의 부분에서, 대기의 외란은 유막을 물방울로 분해하며, 이는 얇은 유막형태로 분무되

는 과정이 된다. 유체유량이 점차로 감소하는 "B" 점에서, 원주방향을 따라 물줄기(ligament)가 형성되어 물줄기형성모드의 분무작용이 일어난다. 또한, 낮은 유속의 "C"점에서 절삭유가 물방울 형태로 원심분리 되어, "3"의 부분에서 보여주는 바와 같이, 물방울 형성 분무작용이 일어난다. 마지막으로, 나머지 절삭유는 "D"점을 통과하고, 그 밖의 것은 표면장력이 원심력보다 커서 공작물에 들러붙어도 유체층(coating liquid layer)을 형성한다.

이러한 물리적 특성으로 인해 절삭유 미립화 현상은 공작기계 운전조건과 사용되는 절삭유의 물성에 좌우될 것으로 판단되며, 구체적으로는 절삭유 공급유량, 회전각속도에 영향을 주는 인자(연삭숫돌 회전수, 연삭숫돌 직경 등), 절삭유의 물성(표면장력, 밀도 등) 등에 직접적인 영향을 받을 것이다. 또한, 가공점 및 주축 부근의 온·습도, 외부 공기 흐름 변화 등에 따른 외란(disturbance), 생성된 미립자간의 충돌(collision), 분리(separation), 융합(coalescence) 등에 의한 2차적인 복잡성과 불명확성(complexity, uncertainty) 등도 미립자 발생 및 거동 특성에 영향을 미치게 된다.

3. 절삭유 미립자의 측정 및 평가

연삭공정에서의 절삭유 미립자 발생 및 거동특성을 보다 과학적으로 이해하기 위해서 절삭유 미립화 정밀측정 실험을 실시하였다. 절삭유 미립자 입경분포, 평균속도, 농도 등을 실시간으로 측정하고 그 결과를 분석하였다.

절삭유 미립자 거동을 측정하기 위해서 Fig.3에 나타낸 바와 같이 위상 도플러 효과(phase doppler effect)를 이용한 미립자 동특성 분석기(Dual-PDA, Particle Dynamics Analyzer, Dantec) 장치를 사용하였으며, 2차원(u, v상)의 미립자 운동속도, 미립자 입경, 농도를 실시간으로 측정할 수 있다.

또한, 이 측정 장치는 Arg-Ion 레이저 소스로부터 생성된 레이저광을 이용하여 Dual-PDA 발광부(transmitter)와 수광부(receiver) 사이에 형성되는 초점에서의 측정검사 체적 내를 최대 470m/s의 속도로 움직이는 최소 0.5 μ m ~ 13mm 직경의 미립자와 분포수를 자동으로 측정하여 출력할 수 있으며, 측정된 신호는 전용 신호처리장치(58N80 Multi PDA signal processor)를 이용하여 디지털오실로스코프(LeCroy 9310A), P/C에 저장하여 분석하며, 동시에

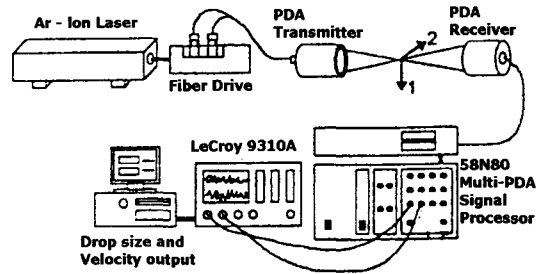


Fig. 3 Dual-PDA system for cutting fluid's aerosol measurement

Dual-PDA 장치에서 측정된 절삭유 미립자의 평균속도(average velocity), 평균입경(average diameter), 농도(concentration) 등을 실시간으로 처리하여 컴퓨터 화면상에 나타낼 수 있다. 실험에서 사용된 연삭숫돌 직경은 200mm로 공구 연삭과 같은 방법으로 공작물을 숫돌 방향으로 이송을 주었고, 절삭유는 수용성 W2종(ROCOL 370)을 5% 농도로 희석하여 사용하였으며, 절삭유는 원형단면(내경 ϕ 3mm) 노즐을 통해 최대 18 lpm (liter/min)까지 변경하여 실험하였다. 숫돌 주변에 형성, 확산되는 절삭유 미립자의 측정은 연삭숫돌 축을 중심으로 500mm 수직상단에서 측정하였으며, 실험장치 주변에 검사체적(control volume)을 형성하여, 측정의 용이성 제고와 공기흐름 등의 외란에 의한 측정오차를 최소화하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭유 미립자의 속도 및 입경 분포특성

절삭유는 연삭숫돌의 고속회전에 의한 원심력과 숫돌 및 공작물과의 충돌로 인해 미립화 된 후 공기 중에 미립자 형태로 확산된다.

Dual-PDA를 이용하여 측정된 절삭유 미립자의 평균 확산속도 분포는 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 이때, 연삭 공작기계 운전조건은 숫돌 회전수 3000rpm, 숫돌 직경 200mm, 절삭유량 18lpm으로 설정한 경우이다.

Fig. 4에는 회전분리기구에 의해 생성된 절삭유 미립자의 평균속도는 u-(수직) 방향이 평균 0.2m/s, v-(수평)방향이 약 0.04m/s의 속도로 공기 중에 확산되고 있음을 알 수 있으며, Fig. 5에는 회전분리기구와 충돌분산기구에 의해 미립화 된 절삭유 미

립자의 평균속도, u방향 -0.18m/s, v방향 0.0046m/s로 확산됨을 확인할 수 있다.

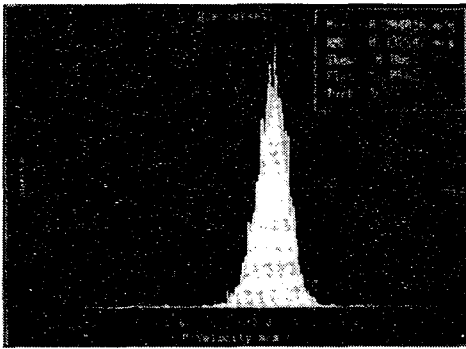
이러한 결과는 이미 발표된 선삭에서의 절삭유 미립자 생성특성^{4,6} 과 비교해 볼 때, 연삭공정에서 생성된 미립자의 u 방향 평균속도는 선삭공정에서 발생된 미립자 평균속도의 5% 정도의 매우 낮은 값으로서, 이는 곧 연삭공정에서 생성된 절삭유 미립자는 직접적인 원심력에 의해 확산되기 보다는 안개형태로 가공점 주변에 발생·존재하며 점진적으로 확산하는 것을 의미하며, 실제 육안으로도 관찰되었다.

또한, 충돌분산기구가 포함된 실험에서는 충돌분산기구에 의해 발생된 평균속도 성분이 다른 절삭유 미립자의 운동이 존재하므로 회전분리기구만

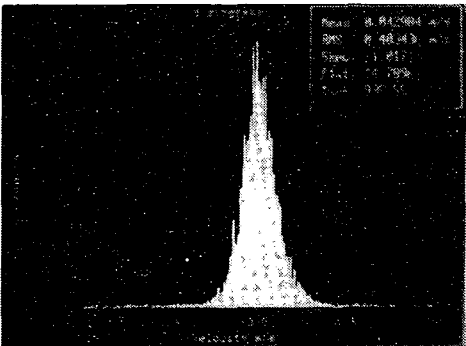
에 의한 경우보다 넓은 속도분포를 나타내고 있다.

Fig. 6 과 Fig. 7 에는 절삭유량 변화에 따른 절삭유 미립자의 입경분포와 평균속도 분포의 상관도를 나타낸 결과이다. 이미 Fig. 4와 5에 대해 기술한 바와 같이, 절삭유 미립자 발생기구에 따라 미립자의 평균속도 분포가 다른 형태로 나타냄을 재확인할 수 있다. 그림에 나타낸 바와 같이, 연삭공정에서 발생되는 절삭유 미립자 입경의 90% 이상이 100 μ m 이내의 미립자 입경을 갖는 것을 알 수 있으며, 그 이상의 미립자 입경을 갖는 것들도 소수 분포하고 있음을 확인하였다.

또한, 동일 연삭숫돌 회전속도에서도 절삭유량의 변화에 따른 미립자 발생특성이 큰 차이를 보이

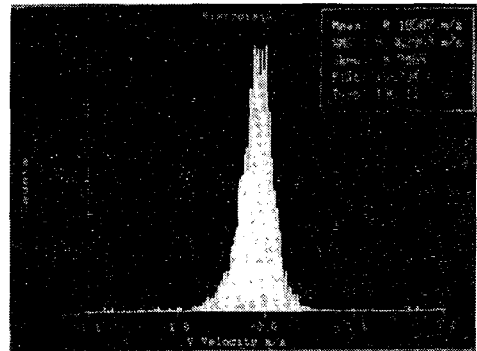


(a) u-directional velocity

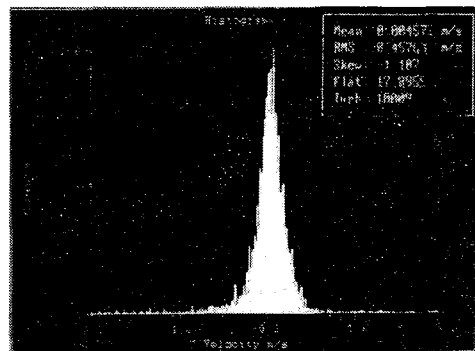


(b) v-directional velocity

Fig. 4 Average velocity distribution of cutting fluid's aerosol particles via spin-off mechanism (3000rpm, ϕ 200, 181pm)

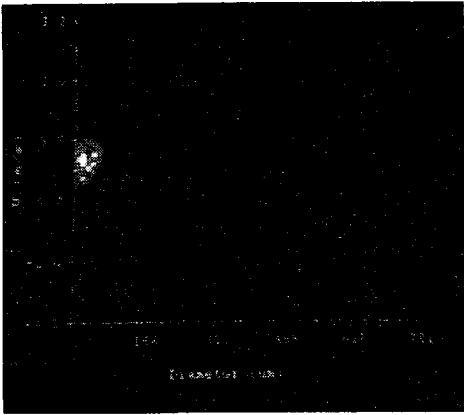


(a) u-directional velocity

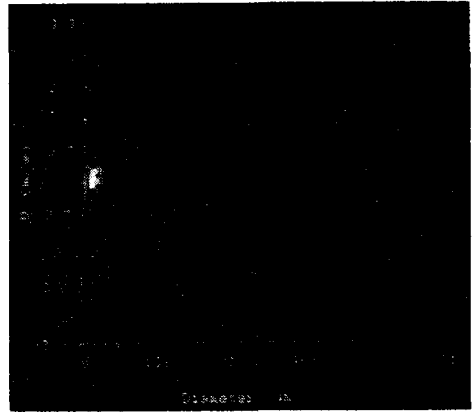


(b) v-directional velocity

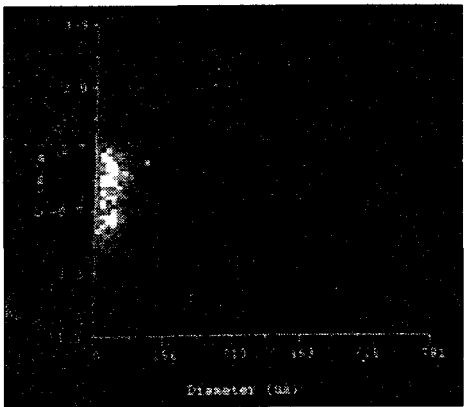
Fig. 5 Average velocity distribution of cutting fluid's aerosol particles via spin-off/splash mechanism (3000rpm, ϕ 200, 181pm)



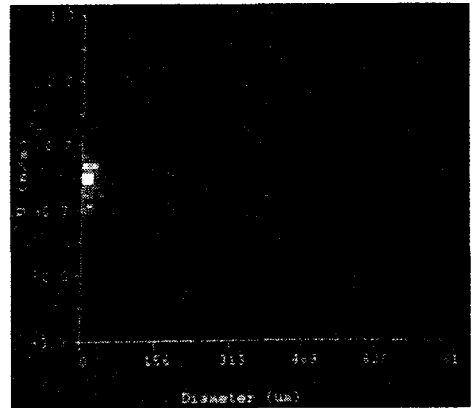
(a) 3000rpm, $\phi 200$, 18lpm



(a) 3000rpm, $\phi 200$, 18lpm



(b) 3000rpm, $\phi 200$, 11lpm



(b) 3000rpm, $\phi 200$, 11lpm

Fig. 6 Correlation plot of cutting fluid's aerosol particle size vs. velocity via spin-off mechanism

Fig. 7 Correlation plot of cutting fluid's aerosol particle size vs. velocity via spin-off/splash mechanism

고 있으며, 절삭유량이 증가할수록 절삭유 미립자의 전체 발생량 증가는 물론, 일정 속도성분과 미소 미립자 입경을 갖는 미립자의 발생이 훨씬 활성화되고 있음을 확인할 수 있다.

반면, 절삭유량이 작을 경우, 미립자의 발생량도 작고, 미립자 입경 분포도 전 측정범위에 산발적으로 분포하게 됨을 알 수 있다. 이러한 결과들은 실험조건에 따라 측정된 미립자로부터 계산되는 미립자 평균 입경 값과 농도에 영향을 줄 수 있음을 의미한다.

절삭유 미립자의 입경과 개체 수 분포에 따라 미립자가 차지하는 표면적과 부피는 다른 형태의 분포를 나타내게 된다. 미립자 입경이 클수록 부피에 미치는 영향이 크게 되며, 작은 미립자의 개수가 많을수록 전체 표면에 미치는 영향이 크게 된다.

선삭공정에서의 절삭유 미립자 발생과 비교해 볼 때, 연삭공정에서는 높은 연삭숫돌 회전수에 비례하여 원심력 증가(최대 4.5배) 시 절삭유 미립자 평균입경은 최대 약 60% 감소한다. 한편, 높은 원

심력 증가에도 불구하고, 미립자의 평균속도는 최대 95% 까지 감소하는 절삭유 미립자 생성특성을 나타내고 있어 선삭공정과는 다른 형태의 미립자 확산 패턴을 나타냄을 확인할 수 있다.

이상의 결과에서 알아본 바와 같이, 연삭공정에서 발생하는 절삭유 미립화자의 입경은 한 가지 값이 아닌, 다양한 입경의 포함하는 미립자의 집합으로 구성되므로, 통상적으로 미립자의 입경별 분포와 개수, 입경 차이, 사용목적 등에 따라 미립자 입경을 표현하는 여러 가지 방법을 갖고 있다.

일반적으로 평균입경 개념을 사용하여 미립자의 입경을 나타낸다. 본 연구에서는 널리 사용되고 있는 산술 평균 입경(arithmetic mean diameter, D_{10})과 부피 대 표면적 평균입경(volume-to-surface-area mean diameter or Sauter mean diameter (SMD), D_{32})를 사용하여 조건별 미립자 입경 크기와 분포를 비교하였다.

본 연구에서는 연삭공정에서 발생하는 절삭유 미립자의 크기를 평균입경 D_{10} , 또는 D_{32} 로 나타내었다.

$$D_{10} = \frac{\sum D \Delta n}{\sum \Delta n} \quad (1)$$

$$D_{32} = \frac{\sum D^3 \Delta n}{\sum D^2 \Delta n} \quad (2)$$

여기서, D 는 입자직경, n 은 미립자 수를 의미한다.

Fig. 8 ~ Fig. 11에 나타낸 바와 같이, 절삭유 미립자의 산술평균입경(D_{10})은 연삭숫돌 회전수가 증가할수록 미립화가 촉진되어 더욱 작은 입경의 절삭유 미립자가 발생함을 알 수 있다. 한편, 절삭유량 변화 자체에 따른 절삭유 미립자 입경 변화는 상대적으로 크지 않으나, 저속의 숫돌 회전수에서는 절삭유량이 증가할수록 절삭유 미립자 입경은 다소 증가하는 경향을 나타낸다.

특히, 회전분리기구와 충돌분산기구가 같이 작용되는 절삭유 미립화 과정 중에서 실험조건(연삭숫돌 회전수: 1,000rpm, 공급 절삭유량: 5lpm 이하)에서는 절삭유의 직접 충돌에 의해 상대적으로 큰 입경의 절삭유 미립자가 측정되었다. 이러한 절삭유 미립자는 발생 빈도 측면에서나 또는 작업자 안전측면에서 그다지 큰 위험도나 영향도가 작으며,

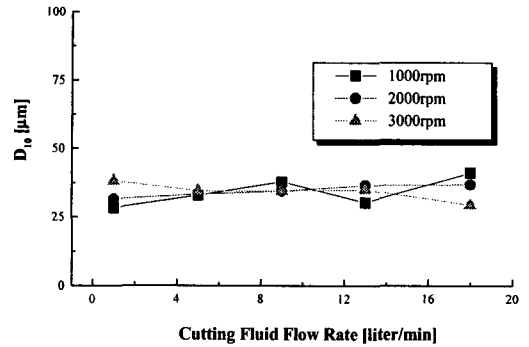


Fig. 8 Variation of particle size (D_{10}) of cutting fluid's aerosol with respect to cutting fluid flow rate via spin-off mechanism

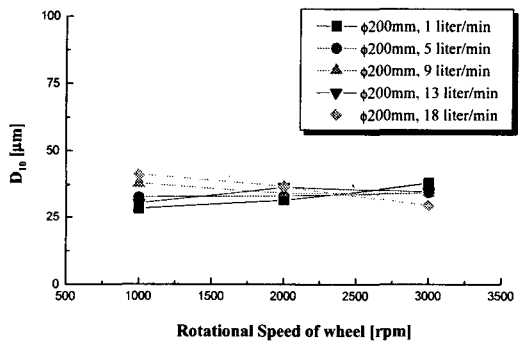


Fig. 9 Variation of particle size (D_{10}) of cutting fluid's aerosol with respect to rotational speed of workpiece via spin-off mechanism

그 외의 조건에서 발생되는 절삭유 미립자는 회전분리기구에 의해 발생하는 절삭유 미립자 입경과 유사한 경향을 나타내고 있다.

국내·외 대기오염 환경기준에서는 대기 중에 떠다니는 입자상 오염물질의 총량을 총 부유 미립자(total suspended particulate, TSP)라고 규정하고 있으며, 인체가 호흡을 통해 폐내로 들어올 수 있는 미립자인 호흡기성 미립자(respirable suspended particulate, RSP)라는 개념으로 PM₁₀ (particulate matters less than 10 μm as an aerodynamic diameter)을 규정하고 있다.

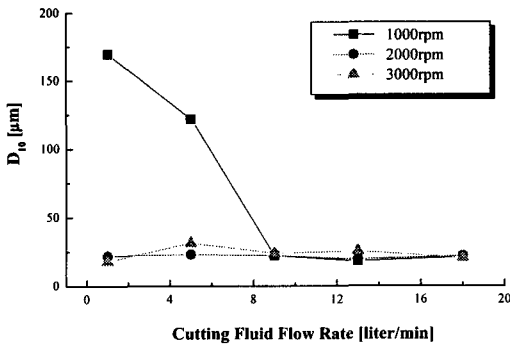


Fig. 10 Variation of particle size (D_{10}) of cutting fluid's aerosol with respect to cutting fluid flow rate via spin-off/splash mechanism

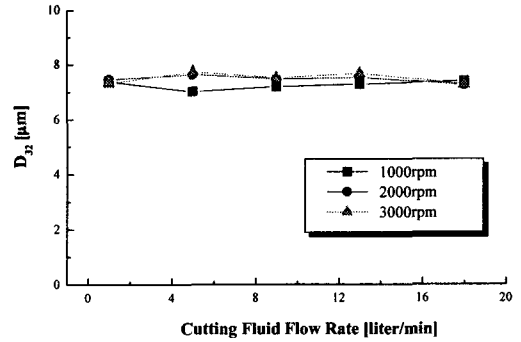


Fig. 12 Variation of particle size (D_{32}) of cutting fluid's aerosol less than $10\mu\text{m}$ with respect to cutting fluid flow rate via spin-off mechanism

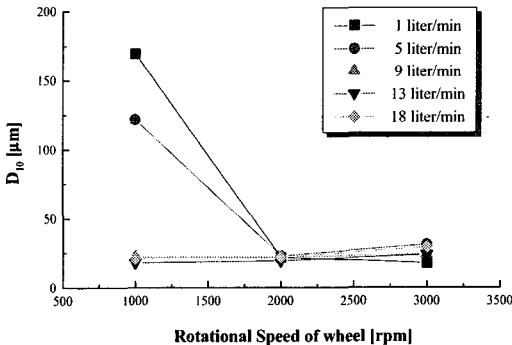


Fig. 11 Variation of particle size (D_{10}) of cutting fluid's aerosol with respect to rotational speed of workpiece via spin-off/splash mechanism

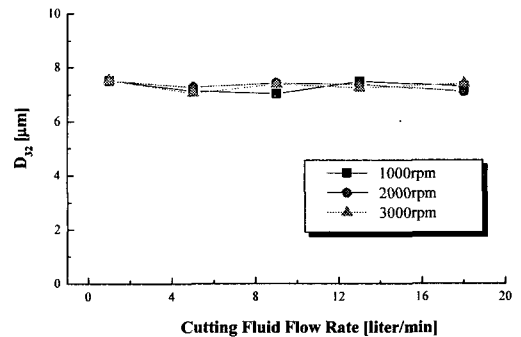


Fig. 13 Variation of particle size (D_{32}) of cutting fluid's aerosol with respect to cutting fluid flow rate via spin-off/splash mechanism

본 실험에서 측정된 절삭유 미립자 중에서 운전 조건에 따른 평균입경 $10\mu\text{m}$ 이하의 미립자 발생특성을 정리해 보면 Fig. 12 및 Fig. 13 과 같다.

이상의 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 회전분리기구 및 충돌분산기구에 의해 발생한 절삭유 미립자의 입경은 $D_{32} = 7\mu\text{m} \sim 8\mu\text{m}$ 수준의 작은 미립자 발생특성을 보이고 있다. Dual-PDA를 이용한 측정범위 최대 $900\mu\text{m}$ 까지에서 측정된 전체 절삭유 미립자중 평균입경 $10\mu\text{m}$ 이하 PM_{10} 에 해당하는 절삭유 미립자는 평균 42.5% 에 해당하는 수치를 나

타냈으며, 이는 선삭공정에서 발생하는 평균입경 $10\mu\text{m}$ 이하 PM_{10} 절삭유 미립자 비율이 평균 12% 이었던 것과 비교해 볼 때, 작업장내 인체 호흡시 유해한 호흡기성 먼지(RSP)의 발생이 커서 작업자의 호흡시 호흡기를 통해 체내로 쉽게 유입될 수 있어 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

4.2 절삭유 미립자의 농도 분포특성

미국 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 금속가공 작업장 내 입자

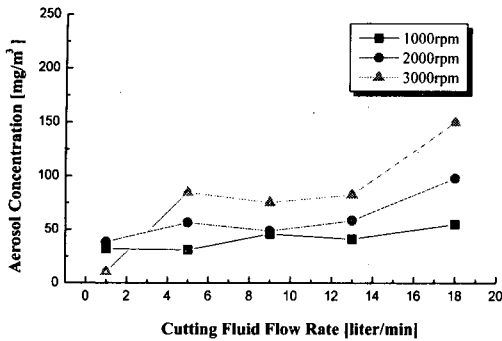


Fig. 14 Comparison of mass concentration of cutting fluid's aerosol with respect to cutting fluid flow rate via spin-off mechanism

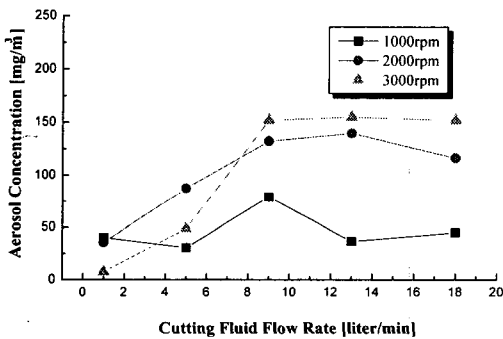


Fig. 15 Comparison of mass concentration of cutting fluid's aerosol with respect to cutting fluid flow rate via spin-off/splash mechanism

상 오염물질의 농도기준을 설정하고, 환경, 위생 및 안전 측면에서의 대기환경 영향을 평가하기 위한 양적인 지표로서 공기 중의 미립자 허용노출 농도를 1998년 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 로 규정 개정되었으며, 이러한 기준은 점차적으로 강화할 계획을 가지고 있다.

농도기준은 개수농도(number concentration)와 질량농도(mass concentration)로 크게 나누어 사용되고 있으며, 측정방법에 따라 각각 채택하여 사용하고 있거나, 또는 상호 환산하여 사용하고 있다.

한편, 운전조건에 따라 발생하는 절삭유 미립자의 특성, 즉 미립자 입경분포, 입경별 입자 수, 주변

환경조건에 따른 외란 등에 의해 매우 복잡한 특성을 나타내는 것이 미립화 기구인 만큼, 적절한 농도 기준과 단위의 설정이 중요하다.

본 실험에서 측정된 절삭유 미립자의 질량농도를 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내어 그 특성을 비교하였다. 발생한 미립자는 미립자의 입경분포와 개수에 따라 미립자가 공기 중에 분산되는 특성(평균속도, 미립자 비행거리 및 궤적, 미립자간의 충돌, 분리, 응합)은 매우 복잡해지므로 실제 측정되는 전체 농도에 충분히 영향을 줄 수 있다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭유량이 증가 할수록, 스톨 회전수가 증가할수록 절삭유 미립화가 촉진되어 절삭유 미립자의 질량농도는 증가하는 경향을 나타낸다. 회전분리기구에 의한 절삭유 미립자 농도는 스톨회전수와 유량에 점진적으로 비례하는 경향을 보이며, 충돌분산기구가 포함된 실험에서는 2000rpm, 5lpm 조건 이상에서 농도 값이 급증하는 경향을 보이고 있다. 또한, 절삭유 미립자 농도변화는 고속회전 조건일수록 절삭유량에 따른 영향을 크게 받게 되는 것은 회전분리기구에 의한 절삭유 미립화 영향이 충돌분산기구에 의한 경우보다 크게 작용하기 때문으로 판단된다.

본 실험에서 채택한 최저 운전조건 1000rpm, 1lpm 의 절삭유 사용조건에서도 이미 NOISH 의 권장 규정치를 넘는 농도 값은 보이고 있다. 이러한 결과는 선삭공정에서의 실험결과와 비교해 볼 때 최대 50배 이상의 절삭유 미립자 농도 발생 증가를 나타내고 있으며, 이미 주지하고 있는 바와 같이, 절삭유 미립자 발생에 대한 적절한 대응책 마련이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 환경친화적 기계가공 기술개발을 목표로 연삭가공공정에서 발생할 수 있는 절삭유 미립자의 발생특성을 알아보기 위한 정밀측정을 실시하였다. 최근, 고속화되는 공작기계의 개발 추세에서 볼 때, 연삭가공에서 발생하는 절삭유 미립화 현상은 대량의 PM_{10} 에 해당하는 호흡기성 미립자를 대량 포함하게 되어, 작업환경 및 안전에 큰 영향을 줄 수 있음을 본 측정결과를 통해 확인할 수 있었다.

본 연구결과를 통해 절삭유 미립화에 의한 환경 위험성을 확인하였으며, 이러한 환경 위험의 심각

성을 인식하고 적절한 환경친화적 기계가공 공정개선 및 개발에 필요한 대책마련이 시급히 요청된다.

후기

본 연구는 “2003년도 한밭대학교 교내학술연구비”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Pfeifer, T., Eversheim, W., König, W. and Weck, M., "Manufacturing Excellence," Chapman & Hall, pp. 517-521, 1994.
2. U.S. Department of Health and Human Services, "Occupational Exposure to Metalworking Fluids," NIOSH Publication, No.98-102, 1998.
3. Bayvel, L., Orzechowski, Z., "Liquid Atomization," Taylor & Francis, 1993.
4. Hwang, J., Chung, E. S., "Optimization of Cutting Fluids for Environmentally Conscious Machining," Korean Society of Precision Engineering Annual Conference, Vol.2, pp.948-951, 2000.
5. Chen, Z., Wong, K., Li, W., Stephenson, D. A., Liang, S. Y., "Cutting Fluid Aerosol Generation due to Spin-Off in Turning Operation: Analysis for Environmentally Conscious Machining," J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol.123, pp.506-512, 2001.
6. Hwang, J., Chung, E. S., Hwang, D. C., "A Study on the Environmentally Conscious Machining Technology - Cutting Fluid Atomization and Environmental Impact through Spin-Off Mechanism in Turning Operation(II)," J. of Korean Society of Precision Engineering, Vol.20, No.2, pp.50-57, 2003.