

환경 친화적 기계가공 기술에 관한 연구 선삭가공시 회전분리기구에 의한 절삭유 미립화와 환경영향(II)

황 준*, 정의식**, 황덕철***

A Study on the Environmentally Conscious Machining Technology Cutting Fluid Atomization and Environmental Impact through Spin-Off Mechanism in Turning Operation(II)

Joon Hwang*, Eui-Sik Chung**, Duk-Chul Hwang***

ABSTRACT

This paper presents the experimental results to verify the atomization characteristics and environmental impact of cutting fluid. Even though cutting fluid improves the productivity through the cooling, lubricating effects, environmental impact due to cutting fluid usage is also increased on factory shop floor. Cutting fluid's aerosol via atomization process can be affected human health risk such as lung cancer and skin diseases. Experimental results show that the generated fine aerosol which particle size less than 10 micron appears near working zone under typical operational conditions. The aerosol concentration also exceeds NIOSH regulations. This research can be provided a basis of environmental impact analysis for environmental consciousness.

Key Words : Environmentally Conscious Machining(환경친화적 기계가공), Spin-Off Mechanism(회전분리기구), Cutting Fluid(절삭유), Atomization(미립화), Environmental Impact(환경영향)

1. 서론

기술수준의 급속한 발달과 함께 고품질의 제품 제조가 국가의 경쟁력을 좌우하는 매우 중요한 국가 전략이 되고 있으며, 전 세계 공업선진국들은 수준 높은 생산가공기술 개발과 연구에 박차를 가하고 있다. 한편, 환경, 위생 및 안전에 대한 관심과 규제가 심화되면서 야기되고 있는 환경문제에 대한 시급한 대응책 마련을 위해, 생산제조 단계에서부터 가공폐기물 및 인체 유해 물질의 발생을 억제하

거나 극소화 하기 위한 예방기술의 개발이 시급히 요청되고 있다.

기계가공공정에 다량으로 사용되고 있는 절삭유는 그 탁월한 효과로 인해 제조생산성과 품질을 높이는데 폭넓게 적용되고 있으나, 과다 사용에 의한 환경오염은 물론, 근로자의 위생 및 안전문제를 발생시키고 있다. 이러한 절삭유의 사용이 오랜동안 주로 경험에만 의존하여 사용되어 왔던 바, 경제성 및 생산성과 환경성 측면에서 정량적으로 균형있는 사용이 불가능하였다. 또한, 종래의 환경관

2002년 7월 8일 접수

* 충주대학교 기계설계학과

** 한밭대학교 기계설계공학과

*** 인천대학교 대학원 기계공학과

런 기술들은 환경적인 측면만을 강조한 나머지, 사용규제 일변도의 접근과 사용후 발생된 폐기물에 대한 사후처리에 주로 관심이 모아져 왔다¹⁾.

최근, 그린라운드(green round)에서 공정 및 생산방법(Process and Production Methods, PPMs) 자체를 환경법규화 함에 따라 공정한 폐기물의 내용과 독성에 대한 규제는 물론, 공정내 사용 원부자재, 각종 오일, 첨가제, 공정중 발생물질 등, 공정전체를 대상으로 한 환경친화적 생산시스템 구축이 매우 시급한 현안이 되고 있다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 기계금속가공공정에서 사용되는 모든 물질에 대한 물질수지(material balance)에 대한 개념 도입은 환경친화적 기계가공을 구현하는데 있어 필수사항이 될 수 있다.

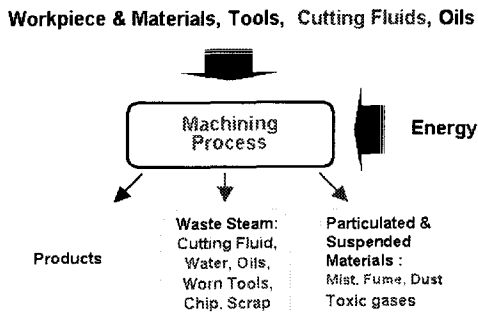


Fig. 1 Material balance for machining process

공정을 통해 배출되는 고상 또는 액상의 각종 폐기물에 대한 처리방법은 상당 부분 연구되고 있으나, 각종 오일사용에 의해 공정중에 발생되는 미립자 형태의 오일-미스트(oil-mist), 흠(fume), 분진(dust) 등에 대한 대책은 총체적인 대기오염의 측면에서만 다루어져 왔을 뿐, 기계가공공정과 관련하여 구체적인 발생 메카니즘 분석 및 저감대책 마련은 미비한 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 작업장내·외의 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 절삭유 미립자의 생성 메카니즘과 거동 특성을 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 환경친화적, 인간친화적 생산시스템 구축이라 사료된다.

2. 절삭유 미립화 메카니즘

기계가공품질 및 생산성 측면에서 폭넓게 사용되고 있는 절삭유는 동작기계의 운동 메카니즘에 의해 매우 복잡한 형태의 미립자 발생을 야기시킨다. 최근, 선진국에서는 작업장내 대기환경영향을 평가하기 위한 양적인 지표로서 공기중의 미립자 크기와 농도를 사용하며, 미국 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서 공기중 금속작업유의 허용노출 농도를 0.5 mg/m^3 로 제한하기 시작했다²⁾.

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

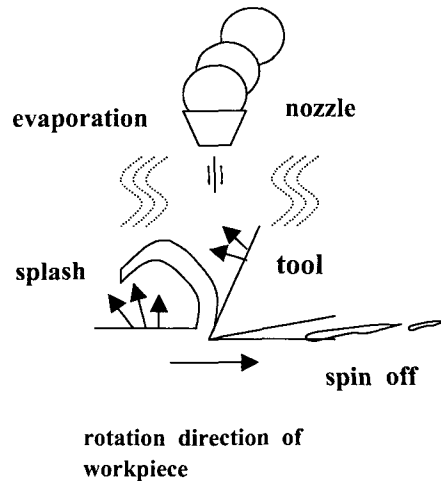


Fig. 2 Aerosol generation of cutting fluids in machining process

Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 절삭유 미립화 기구는 크게 3가지 메카니즘으로 구성된다. 먼저, 회전

분리(spin-off)는 부품의 회전운동에 의한 표면에서의 원심력에 의해 공작물로부터 튕겨나와 일어난다. 실험적인 관측결과에 따르면 분리작용에 의한 미립자 발생율은 전체의 80% 이상을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 충돌분산(splash)은 공구와 공작물에 절삭유 입자의 충돌에 의한 운동량의 전달로 일어난다. 증발(evaporation)은 절삭점 부근의 높은 온도에 의해 접촉유체가 증기상태로 되는 것을 말한다.

Fig. 3은 선삭가공시, 절삭유가 공구와 공작물상에서 비산되는 상태를 나타낸다. 그림에서 절삭유 제트분류 상의 중심부(Part B)는 마치 2차원 운동을 하고 있는 회전원판을 형성하며, 바깥 부분(Part A)은 낮은 유속으로 인해 얇은 박판의 유막을 형성하게 된다.

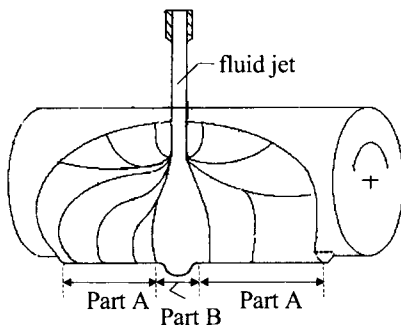


Fig. 3 Typical cutting fluid behavior in machining process

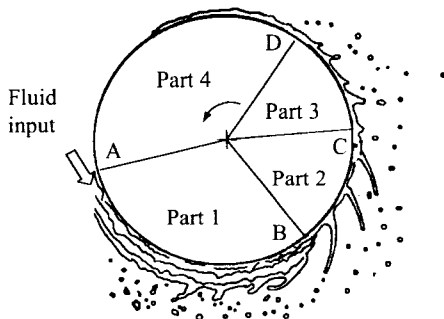


Fig. 4 Rotary disk atomization process and three formation modes

절삭유 미립자의 미립화과정은 유체분사나 얇은 유막이 유체운동에너지나 혹은 고속공기의 상호작용, 운동장치를 통한 외부에너지에 의해 물방울 형태로 떨어져 분산된다. 유체 회전원판의 형태는 유속에 따라 유막형성모드(film formation mode), 물줄기 형성모드(ligament formation mode), 물방울형성 모드(drop formation mode)의 3가지 미립화형태를 갖는다³⁾.

Fig. 4는 "A"점에서 절삭유가 공작물주변에 어떻게 유막을 형성하는지를 보여주고 있다. 유속이 높은 "1"의 부분에서, 대기의 외란은 유막을 물방울로 분해하며, 이는 얇은 유막형태로 분무되는 과정이 된다. 유체유량이 점차로 감소하는 "B"점에서, 원주방향을 따라 물줄기(ligament)가 형성되어 물줄기형성모드의 분무작용이 일어난다. 또한, 낮은 유속의 "C"점에서 절삭유가 물방울 형태로 원심분리되어, "3"의 부분에서 보여주는 바와 같이, 물방울형성 분무작용이 일어난다. 마지막으로, 나머지 절삭유는 "D"점을 통과하고, 그 밖의 것은 표면장력이 원심력보다 커서 공작물에 달라붙어 도포 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(주축회전수, 공구 또는 공작물의 직경 등), 절삭유의 물성(표면장력, 밀도 등) 등에 직접적인 영향을 받을 것이다. 또한, 가공점 및 주축 부근의 온도, 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

본 연구에서는 각 절삭유 미립자 발생 기구별로 발생 특성을 보다 과학적으로 이해하기 위해 미립화 측정실험을 실시하였으며, 특히 회전분리기구에 의한 절삭유 미립자 거동특성을 고찰하기 위하여 운전조건에 따른 절삭유 미립자 입경분포, 평균속도, 농도 등을 실시간으로 측정하고 그 결과를 분석하였다. 본 측정을 통해 확보된 자료들은 향후 정립될 절삭유 미립화 예측모델에 필요한 각종 계

수들을 구하는데 이용되며, 예측모델의 검증 및 교정도 이용한다.

절삭유 미립자 거동을 측정하기 위해서는 위상도플러효과(phase doppler effect)를 이용한 미립자동특성분석기(Dual-PDA, Particle Dynamics Analyzer, Dantec) 장치를 사용하였으며, 2차원(u, v상)의 미립자 운동속도, 미립자 입경, 농도를 실시간으로 측정할 수 있다.

또한, 이 측정장치는 Arg-Ion 레이저 소스로부터 생성된 빛을 이용하여 최대 470m/s의 속도로 움직이는 최소 0.5 μ m~13 mm 직경의 미립자와 분포수를 자동으로 측정하여 출력할 수 있으며, 측정된 자료는 전용신호처리장치(58N80MultiPDA signal processor)를 이용하여 디지털오실로스코프(LeCroy 9310A), P/C에 저장하여 분석하며, 동시에 PDA 장치에서 측정된 절삭유 미립자의 평균속도(average velocity), 입경(diameter), 농도(concentration) 등을 실시간으로 처리하여 컴퓨터 화면상에 나타낼 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭유 미립자의 속도 및 입경 분포특성

공작물의 고속회전에 의한 원심력으로 인해 절삭유는 회전분리되어 미립화된 후 공기중에 작은 물방울 형태로 확산된다. PDA를 이용하여 절삭유 미립자의 확산속도를 u, v 방향으로 측정된 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었으며, 이때 공작기계 운전 조건은 공작물회전수 2000rpm, 공작물직경 100mm, 절삭유량 18 ℓ /min로 설정한 경우이다.

절삭유 미립자는 초기 미립자 발생, 비행, 자유낙하의 형태로 공기중에 확산되며, 주축회전 2000rpm 조건에서 측정된 미립자의 평균속도는 u-(수직) 방향이 평균 3.75m/s, v-(수평)방향이 약 0.1 m/s의 속도로 공기중에 확산되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, u-방향의 속도성분이 음(-)의 수로 표시된 것은 측정좌표 설정에 따른 차이이며, 속도절대값은 같다.

또한, 절삭유 미립자의 입경분포는 Fig. 7에 나타낸 바와 같은 히스토그램으로부터 95% 이상이 100 μ m이내에 미립자 입경을 갖는 것을 알 수 있으며, 그 이상의 미립자입경을 갖는 것들도 소수 분포하고 있음을 확인하였다.

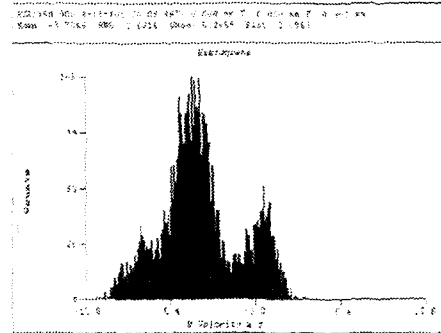


Fig. 5 Average velocity distribution of cutting fluid's aerosol particles on u-direction (2000rpm, ϕ 100, 18 ℓ /min)

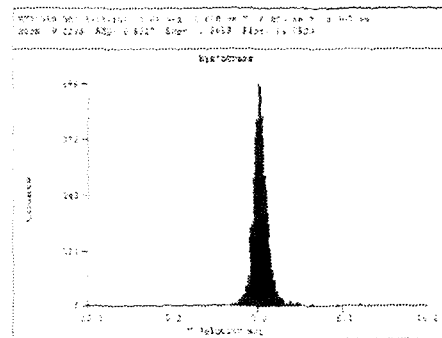


Fig. 6 Average velocity distribution of cutting fluid's aerosol particles on v-direction (2000rpm, ϕ 100, 18 ℓ /min)

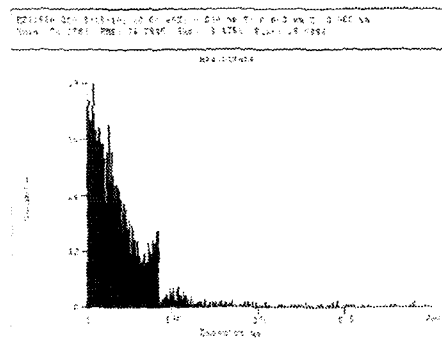


Fig. 7 Size distribution of cutting fluid's aerosol particles (2000rpm, ϕ 100, 18 ℓ /min)

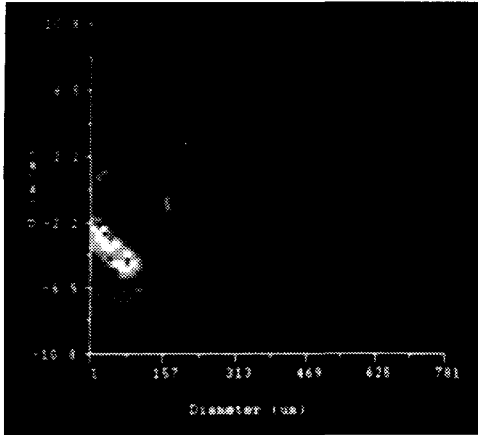


Fig. 8 Correlation plot of cutting fluid's aerosol particle size vs. velocity (2000rpm, $\phi 100$, 18 ℓ / min)

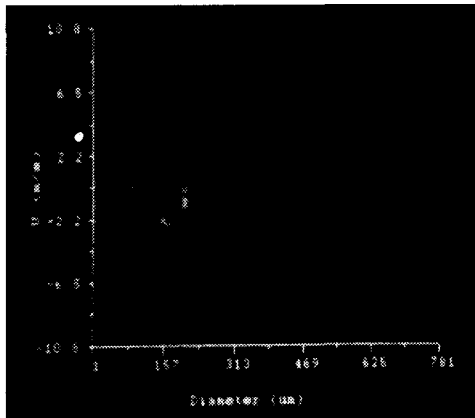


Fig. 9 Correlation plot of cutting fluid's aerosol particle size vs. velocity (2000rpm, $\phi 50$, 1 ℓ / min)

Fig. 8과 Fig. 9에는 절삭유량 변화에 따른 절삭유 미립자의 입경분포와 평균속도 분포의 상관도를 나타낸 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 동일 공작물 회전속도에서도 절삭유량과 공작물 직경변화에 따른 미립자 발생특성이 큰 차이를 보이고 있으며, 절삭유량이 증가할수록 절삭유 미립자의 전체 발생량 증가는 물론, 일정 속도 성분과 일정 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 입경값(diameter)과 입자의 개수농도(number concentration) 결정에 큰 영향을 줄 수 있음을 의미한다.

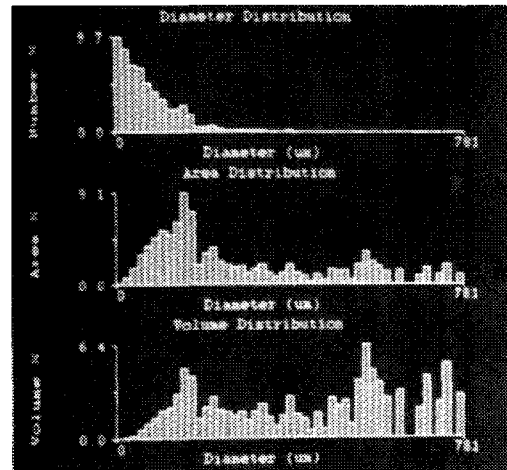


Fig. 10 Cutting fluid's aerosol particle distribution histogram in terms of aerosol size, surface area, volume (2000rpm, $\phi 100$, 18 ℓ / min)

절삭유 미립자의 입경, 표면적, 체적 분포 히스토그램을 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭유 미립자의 입경과 개체수 분포에 따라 미립자가 차지하는 표면적과 부피는 다른 형태의 분포를 나타내게 된다. 미립자 입경이 클수록 부피에 미치는 영향이 크게 되며, 작은 미립자의 개수가 많을수록 전체 표면적에 미치는 영향이 크게 된다. 따라서, 미립자의 입경별 분포와 개수, 입경 차이, 사용목적 등에 따라 미립자 입경을 표현하는 여러 가지 방법을 갖고 있다.

이와같이, 기계가공 공정에서 회전분리기구에 의해 발생하게 되는 절삭유 미립자 입경은 서로 다른 다양한 분포를 나타내게 되므로, 일반적으로 평균입경 개념을 사용하여 미립자의 입경을 나타낸다. 본 연구에서는 미립화 분야에서 일반적으로 폭넓게 사용되고 있는 산술 평균 입경(arithmetic mean diameter, D_{10})과 부피 대 표면적 평균 입경(volume-to-surface-area mean diameter or Sauter mean diameter

(SMD), D_{32})를 사용하여 조건별 미립자 입경 크기와 분포를 비교하였다.

본 연구에서는 절삭유량, 공작물회전수, 공작물 직경을 기계가공과 밀접한 공작기계 운전조건으로 설정하였으며, 각각의 조건에서의 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 미립자수를 의미한다.

또한, 절삭유 미립자의 입경분포 정도와 상대적으로 큰 입경의 미립자 분포가 갈수록 D_{32} 로 표시한 평균입경값이 D_{10} 값보다 과도하게 나타날 수도 있다.

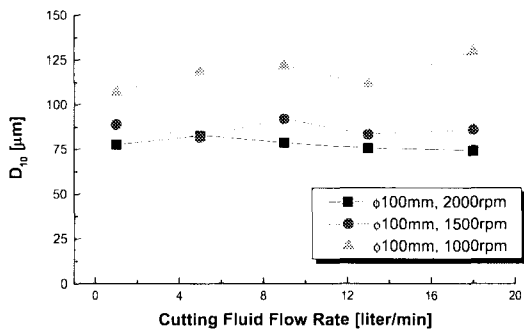


Fig. 11 Variation of particle size (D_{10}) of cutting fluid's aerosol with respect to cutting fluid flow rate

Figure 11~Fig. 13에 나타낸 바와 같이, 절삭유 미립자의 산술평균입경 (D_{10})은 공작물회전수가 증가할수록, 공작물직경이 증가할수록 미립화가 촉진되어 더욱 작은 입경의 절삭유 미립자가 발생함을 알 수 있다. 즉, 절삭유 미립자 입경은 원심력에 영향을 크게 받게 되므로 공작물회전수, 공작물직경 증가에 반비례하여 작아지는 특성을 가지고 있다. 한편, 절삭유량 변화자체에 따른 절삭유 미립자 입경 변화는 상대적으로 크지 않으나, 공작물회전수나 공작물직경 조건과 결합하여 절삭유량이 증가

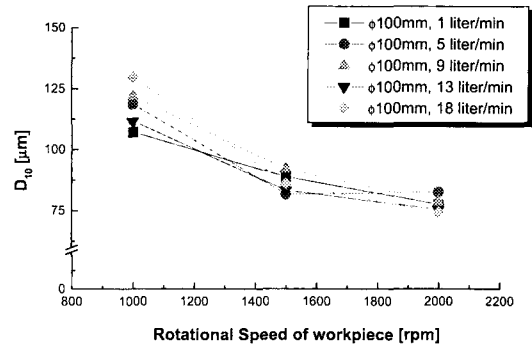


Fig. 12 Variation of particle size (D_{10}) of cutting fluid's aerosol with respect to rotational speed of workpiece

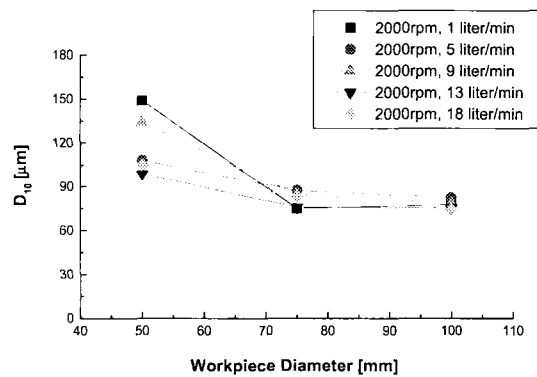


Fig. 13 Variation of particle size (D_{10}) of cutting fluid's aerosol with respect to workpiece diameter

할수록 미립자 입경은 다소 증가하는 경향을 나타낸다.

국내외 대기오염 환경기준에서는 대기중에 떠다니는 입자상 오염물질의 총량을 총부유먼지(total suspended particulate, TSP) 라고 규정하고 있으며, 인체가 호흡을 통해 폐내로 들어올 수 있는 먼지인 호흡성 먼지(respirable suspended particulate, RSP) 라는 개념으로 PM_{10} (particulate matters less than $10 \mu m$ as an aerodynamic diameter)을 규정하고 있다.

본 실험의 Dual-PDA 시스템으로 측정된 절삭유 미립자 중에서 운전조건에 따른 평균입경 $10 \mu m$ 이하의 미립자 발생특성을 나타내면 Fig. 14, Fig. 15와 같다.

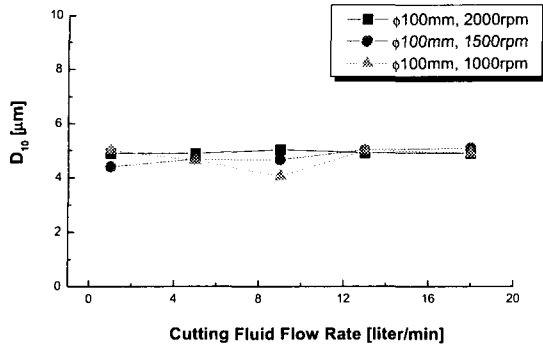


Fig. 14 Variation of particle size (D_{10}) of cutting fluid's aerosol less than $10\mu\text{m}$ with respect to cutting fluid flow rate

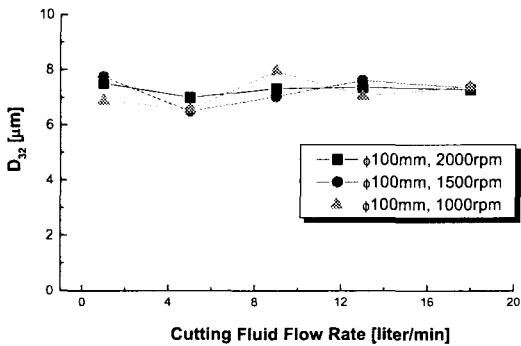


Fig. 15 Variation of particle size (D_{32}) of cutting fluid's aerosol less than $10\mu\text{m}$ with respect to cutting fluid flow rate

이상의 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭유 미립자 입경은 평균 $D_{10} = 4\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$, $D_{32} = 7\mu\text{m} \sim 8\mu\text{m}$ 수준의 작은 미립자 발생특성을 보이고 있다. 또한, 절삭유량 증가에 따라 입경은 다소 증가하는 경향은 보이고 있으나, 큰 차이는 아닌 것으로 확인되었으며, 1000rpm 이상, 1 l/min 이상의 통상적인 가공조건에서 발생하는 미립자는 작업자의 호흡시 호흡기를 통해 체내로 유입되어 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있다.

4.2 절삭유 미립자의 농도 분포특성

미국 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서 금속가공작업장내 입자상 오염물질의 농도기준을 설정하고, 환경, 위생 및 안전측면에서의 대기환경영향을 평가하기 위한 양적

인 지표로서 공기중의 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 입자수, 주변 환경조건에 따른 외란 등에 의해 매우 복잡한 특성을 나타내는 것이 미립화 기구인 만큼, 적절한 농도 기준과 단위의 설정이 중요하다. 본 실험에서 측정된 농도를 Fig. 16에는 개수농도를, Fig. 17에는 질량 농도를 나타내어 그 특성을 비교하였다.

개수농도의 경우, 단위부피당, 단위시간내에 발생된 절삭유 미립자의 갯수로서 표현되는 만큼, 운전조건에 따른 미립화 특성에 영향을 받을 수 있는 가능성이 커지게 된다. 예를 들어 동일 유량에서도 공작물 회전수가 증가할수록 회전각속도 증가로 인해 미립화가 촉진되어 개수농도는 증가하게 된다.

한편, 발생된 미립자의 입경분포와 개수에 따라 미립자가 공기중에 분산되는 특성(평균속도, 미립자 비행거리 및 궤적, 미립자간의 충돌, 분리, 융합)은 매우 복잡해지므로 측정되는 개수농도에 영향을 줄 수 있다³⁾.

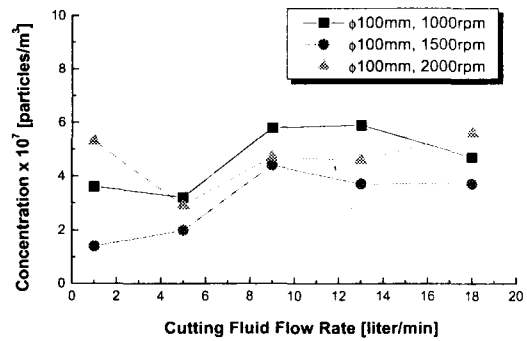


Fig. 16 Comparison of number concentration of cutting fluid's aerosol with respect to cutting fluid flow rate

이미 언급한 바와 같이, NIOSH에서 규정하고 있는 질량농도로 Fig. 16의 개수농도를 계산해보면, Fig. 17에 나타낸 바와 같은 결과를 얻을 수 있다.

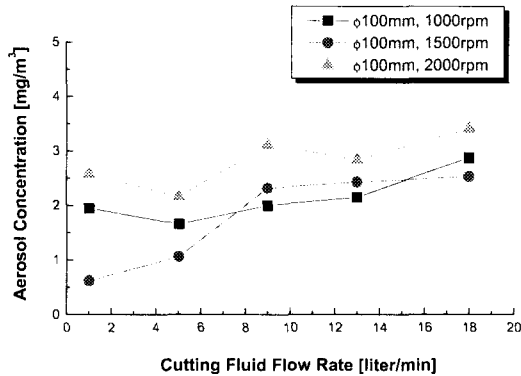


Fig. 17 Comparison of mass concentration of cutting fluid's aerosol with respect to cutting fluid flow rate

결과에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭유량이 증가할수록, 주축회전수가 증가할수록 절삭유 미립자의 질량농도는 증가하는 경향을 잘 나타내고 있으며, 개수농도와 비교해볼 때 고속 주축회전에 따른 절삭유 미립화 특성을 잘 반영하는 것으로 판단된다.

또한, 통상적인 공작기계(선반) 운전조건에서 발생하는 절삭유 미립자 농도는 이미 NIOSH에서 규정하고 있는 농도기준을 초과하고 있음을 알 수 있으며, 따라서 이러한 환경위험상태를 정확히 알고 가공조건 설정 및 환경위험요소 제거 및 극소화 방안을 수립해야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 환경친화적 기계가공 기술개발을 목표로 기계가공공정에서 발생하는 절삭유 미립자 발생특성을 알아보기 위한 정밀측정을 실시하였다. 통상적인 가공조건에서 발생된 미립자는 호흡기 안전에 영향을 줄 수 있는 10 μ m이하의 미립자가 발생함을 알 수 있었으며, 공작물 주위에 존재하는 미립자 농도는 NIOSH 기준을 초과하는 것으로 확인되었다.

본 연구결과를 통해 절삭유 미립화에 의한 환경위험성을 확인하였으며, 이러한 환경위험의 심각성을 인식하고 적절한 환경친화적 기계가공 공정개선 및 개발에 필요한 대책마련이 시급히 요청된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 NO. 2001-1-30400-026-2 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Pfeifer, T., Eversheim, W., König, W., "Manufacturing Excellence," 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.