

Dual-PDA를 이용한 절삭유 에어로졸 특성분석에 관한 연구(I) - 선삭공정을 중심으로

A Study on the Characteristics Analysis of Cutting Fluid Aerosol Using Dual-PDA System - for Turning Process

황 준*, 정진열*, 황덕철**, 홍기배*, 우창기**
J. Hwang*, J. Y. Jeong*, D. C. Hwang**, G. B. Hong*, C. K. Woo**

Abstract

The proposed research has been performed to know the characteristics of cutting fluid aerosol formation using Dual-PDA system in machining process. The cutting fluid aerosol size and concentration is common attributes that quantify the environmental intrusiveness or air quality contamination. The atomized cutting fluid aerosols can be affected to human health risk such as lung cancer and skin irritations. Even though cutting fluid can be improved the machining quality and productivity in a company, its use must be controlled and optimized carefully. This experimental works using Dual-PDA were performed to analyze the cutting fluid aerosol behaviors and characteristics in turning process using precise aerosol particle measuring system. The obtained experimental results provide basic knowledge to develop the environmentally conscious machining process. This results can be provided as a basis to estimate and control the hazardous cutting fluid aerosol in machining process.

주요기술용어 : Cutting Fluid Aerosol (절삭유 에어로졸), Dual-PDA(Dual-Particle DynamicsAnalyzer), Turning Process (선삭공정), Environmentally Conscious Machining (환경친화적 기계가공)

1. 서론

기계가공품질 향상과 생산성 제고 측면에서 폭넓게 사용되고 있는 절삭유는 절삭기구와 공작기계구동 메카니즘에 의해 매우 복잡한 형태의 절삭유에어로졸을 발생시킨다.

특히, 이때 발생하는 절삭유 에어로졸은 대

기 중에 장·단시간 부유하다가 사업장내 주변과 공작기계를 오염시키며, 실내 대기오염으로 인해 근로자에게 호흡기 질환을 유발시킬 수 있으며, 과도한 절삭유 사용은 피부독 등 피부질환의 원인이 될 수 있다고 보고되고 있다.⁽¹⁾

또한, 절삭유는 광물성, 식물성 또는 석유계 합성오일을 기유(base oil)로 하여 윤활특성을 향상시키기 위해 극압첨가제를 비롯한 각종 첨가물질이 함유되어 있다. 고정밀 부품 및 금형에 대한 요구수준이 높아지면서, 가공정밀도 향상을 위해 많은 량의 절삭유가 실제 기계가

+ 책임저자, 충주대학교 기계공학부

E-mail : jhwang@chungju.ac.kr

Tel : 043-841-5376

* 충주대학교 기계공학부

** 인천대학교 기계공학과

공시에 사용되고 있으며, 이는 곧 절삭유 에어로졸 발생에 의한 환경, 위생, 안전(EHS: Environment, Health, Safety) 측면에서의 시급한 대책마련을 필요로 하게 되었다.

그러나, 현재까지 공정 중에 발생하는 절삭유 에어로졸 형태의 오일-미스트(oil-mist), 흙(fume)등에 대해서는 총체적인 대기오염의 측면에서만 다루어져 왔을 뿐, 보다 근본적인 저감이나 제거를 위한 대책수립을 위하여 구체적인 연구는 그다지 많이 이루어지지 못한 상태이다.⁽¹⁾

최근, 선진국을 중심으로 이러한 절삭유 에어로졸에 대한 폐해 및 대책마련의 일환으로 작업장내 대기환경영향을 평가하기 위한 지표로서 공기 중의 에어로졸 입경과 농도에 대한 기준을 마련하였으며, 미국 NIOSH에서는 공기 중 금속작업유의 허용노출 농도를 0.5 mg/m³로 권고하기 시작했다⁽²⁾.

또한, 이와 관련한 국외관련연구로서 Bennett⁽³⁾ 등에 의해 금속가공액 미립자가 작업현장의 청결성과 작업자의 건강에 미치는 영향에 대하여 보고하였으며, Howes⁽⁴⁾ 등은 연삭액의 유독성과 그 처리방법에 대하여 조사하여 환경친화적 관점에서 연삭유 유해성에 대한 광범위하고 계통적인 연구의 필요성을 강조하였다. Yue⁽⁵⁾ 등은 폐기물 유출을 유발하는 절삭유의 분산과 분무작용에 있어서 임계조건을 구하기 위한 절삭유 미스트 형상모델을 제안하였다. 한편, 국내에서는 Hwang⁽⁶⁾ 등에 의해서 절삭유 미립화 현상과 에어로졸 발생에 따른 문제점들이 소개되어 연구되기 시작하였으며, 미립화 메커니즘에 대하여 보다 심도있는 연구가 필요함을 인식하기 시작하였다.

본 연구에서는 작업장내-외의 대기오염과 밀접한 관련이 있으며, 작업자의 호흡기 질환 및 피부질환 발생을 유발시켜 작업자의 안전에 영향을 미치면서도 그 제어가 가장 어려운 절삭유 에어로졸의 생성 메커니즘과 거동특성을 분석하기 위한 정밀측정실험을 실시하였다. 이러한 접근은 절삭유 미립화 현상에 의한 환경, 위생, 안전 측면의 폐해정도를 정확히 인식할 수 있게 하여 보다 과학적이고 근원적인 대책

수립에 착수할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 절삭유 미립화 기구

절삭유 미립화 기구는 크게 3가지 메커니즘으로 구성된다. Fig.1 에 나타낸 바와 같이 첫째, 공작물표면상을 흐르는 절삭유가 공작물의 회전원심력에 의해 반경방향으로 유막이 분리되면서 미립화 되는 회전분리기구(spin-off mechanism)와 둘째, 공구나 공작물과 절삭유가 직접적으로 충돌하면서 운동량 전달로 인해 미립화 되는 충돌분산 기구(splash mechanism), 셋째, 높은 절삭온도의 절삭점(cutting point)에 절삭유가 접촉하면서 미립화 되는 증발기구(evaporation mechanism)로 나누어 볼 수 있다.^(5,6)

공작물의 회전원심력에 의해 공급된 절삭유가 원주방향을 따라 미립화하는 현상을 회전미립화기구(rotary atomization process)로 모델링할 수 있으며, 그 개략도를 Fig.2에 나타내었다.⁽⁷⁾

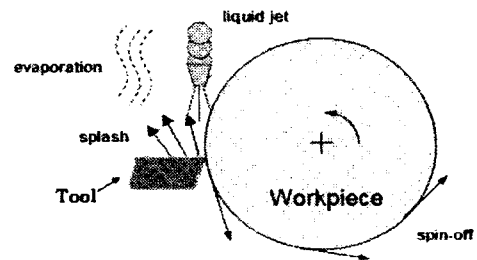


Fig. 1 Cutting fluid aerosol generation process in turning operation

절삭유 노즐로부터 공급된 절삭유 액주는 A 점으로부터 공작물과 접촉하면서 공작물 표면을 따라 회전하면서 흐르게 된다. Part 1 부분에서 액막을 형성하면서 공작물과 함께 회전하게 되며, 이때 액막으로부터 절삭유가 미립화되는 액막형성모드(film formation mode)와 공작물 표면상에 잔류하는 절삭유가 Part 2 지점을 통과하면서 액주(ligament)를 형성하게 되고, 이로 부터 에어로졸이 생성되는 액주형성모드(ligament formation mode)가 존재한다. 또

한. Part 3에서는 소량의 절삭유만이 공작물 표
면상에서 미립화 되는 액적형성모드(drop
formation mode)에 의해 절삭유는 작은 에어로
졸 형태로 대기중에 분산된다. 또한, 잔류 절
삭유는 D 점을 통과하여 Part 4에서 코팅액막
층(coating liquid layer)을 형성하면서 공작물
과 함께 회전하게 되고, 공급되는 절삭유 액주
와 다시 충돌하게 된다.

이러한 물리적 특성으로 인해 절삭유 미립화
현상은 공작기계 운전조건과 사용되는 절삭유
의 물성에 좌우될 것으로 판단되며, 구체적으
로는 절삭유 공급유량, 회전각속도에 영향을
주는 인자(주축회전수, 공구 또는 공작물의 직
경), 절삭유 물성(표면장력, 밀도 등) 등의 직접
적인 영향을 받을 것이다.

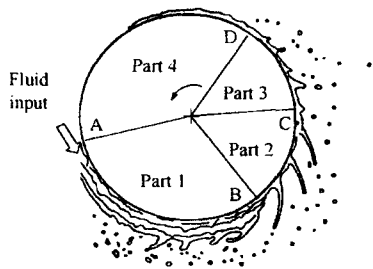


Fig. 2 Rotary atomization process of cutting fluid around the workpiece in turning

3. 실험장치 및 실험방법

본 연구에서는 절삭유 에어로졸의 생성 및
분산특성을 보다 과학적으로 이해하기 위하여
에어로졸 정밀측정을 실시하였다. 각각의 공작
기계 운전조건에 따른 절삭유 에어로졸의 입
경, 속도 분포를 실시간으로 측정하고 그 결과
를 분석하였다. 본 분석결과는 향후 기계가공
공정에서 발생하는 절삭유 에어로졸의 거동특
성을 예측하기 위한 예측모델확립에도 활용될
것이다.

공작물 주변에 발생하는 절삭유 에어로졸 거
동을 측정하기 위해서는 Fig.3에 나타난 바와
같은 위상 도플러 원리를 이용하여 미립자 거

동을 측정할 수 있는 Dual PDA(Dual Particle
Dynamics Analyzer, Dantec/Invent) 시스템을
사용하였으며, 2차원(u, v상)의 에어로졸 속도,
입경을 실시간으로 측정할 수 있다.

또한, 이 측정장치는 Ar-Ion 레이저 소스에
서 공급된 레이저빔은 400 mm 초점거리를 갖
는 transmitter로 보내져 검사체적 초점을 형성
하게 된다. 이때, 검사체적을 통과하는 최대속
도 470m/s, 입경 0.4 μm ~ 900 μm 범위의 절
삭유 에어로졸이 절삭유 receiver를 통해 측정
된다. 측정신호는 전용신호처리장치(58N80
MultiPDA signal processor)와 소프트웨어인
Sizeware를 통해 절삭유 에어로졸의 평균속도
및 입경 값이 실시간으로 계산되고 컴퓨터상에
저장되어 분석된다.

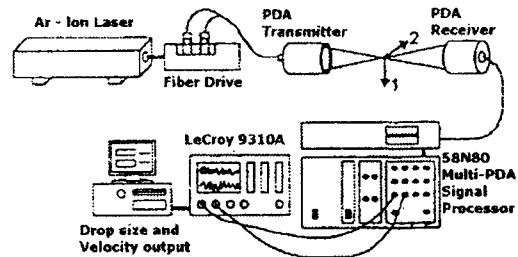


Fig. 3 Dual-PDA system for cutting fluid aerosol measurement

실험에 사용된 절삭유는 수용성 절삭유 W2
종 (Rocol 370+) 으로서 5% 농도로 희석하여
절삭유 직경 $\phi 3\text{mm}$ 노즐을 통해 물줄기 형태로
최대 18lpm으로 절삭유를 공급하였다. 또한, 사
용된 공작물 직경은 $\phi 50 \sim \phi 100\text{mm}$, 주축회전
속도는 1000 rpm ~ 2000 rpm 조건으로 실험을
실시하였다.

이때 생성되는 절삭유 에어로졸의 입경과 속
도를 공작물 표면 상단으로 부터 수직 115mm
위치에서 측정하였다. 특히, 생성된 미립자가
외부 공기흐름 등에 의해 비정상적으로 산란되
는 것을 방지하기 위하여 시설을 실험장치 주
변에 설치하였다.

또한, 절삭유 에어로졸의 농도

(concentration)는 광산란식 분광계(kanomax, Model 3121)을 이용하여 실시간으로 측정하고 분석하였다.

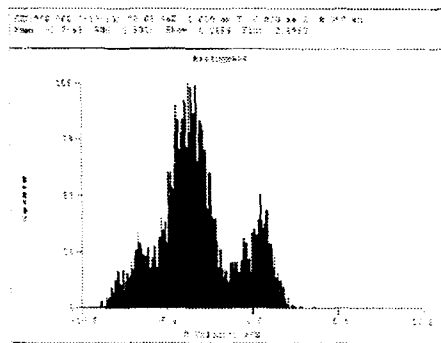
본 논문에서는 회전분리기구 단독조건 (spin off)과 회전분리 및 충돌분산의 복합조건 (spin-off & splash)으로 나누어 절삭유 에어로졸 생성특성을 측정·분석하였다.

4. 실험결과 및 고찰

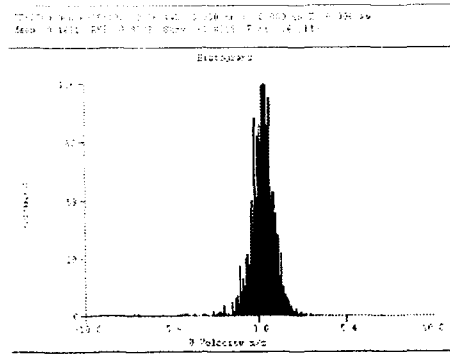
4.1 절삭유 에어로졸의 속도 및 입경 분석

선삭공정에서 미립화된 절삭유 에어로졸의 거동특성을 알아보기 위하여 회전분리기구와 회전분리 및 충돌분산 기구로 나누어 Dual-PDA를 이용하여 절삭유 에어로졸의 확산속도를 u(수평), v(수직) 방향으로 측정된 결과를 Fig.4와 Fig.5에 나타내었으며, 이때 운전조건은 공작물회전수 2000rpm, 공작물직경 100mm, 절삭유량 18lpm 으로 설정하였다.

Figure 4에 나타낸 바와 같이, 회전분리기구에 의해 생성된 절삭유 에어로졸 평균속도는 u(수평)방향이 평균 3.75m/s, v(수직)방향이 약 0.1 m/s로 나타났다. 또한, Fig.5에 나타낸 바와 같이, 회전분리기구와 회전분리 및 충돌분산기구에 의해 미립화된 절삭유 에어로졸의 평균속도는 u방향 0.16m/s, v방향 0.32m/s 임을 알 수 있다. 특히, 충돌분산기구로 부터 생성된 에어로졸속도성분이 회전분리기구에 의한 것보다 속도분포가 집중된 경향을 보이고 있다.

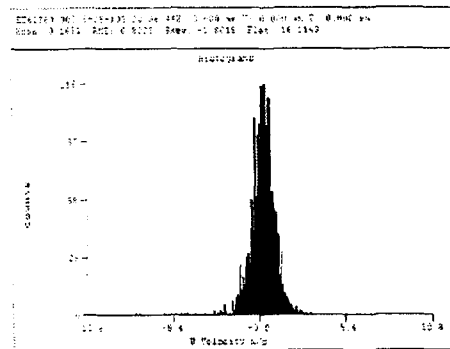


(a) u-directional velocity

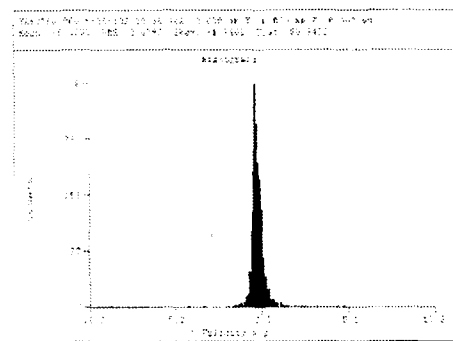


(b) v-directional velocity

Fig. 4 Average velocity distribution of cutting fluid aerosol via spin-off mechanism (2000rpm, 100mm, 18lpm)

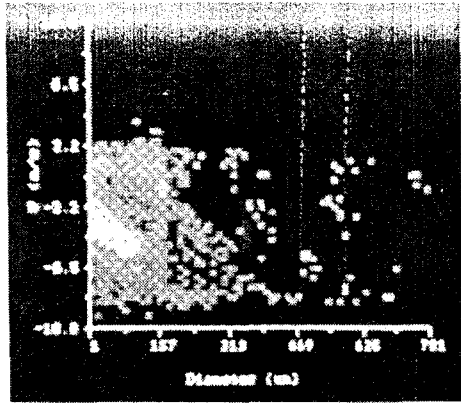


(a) u-directional velocity

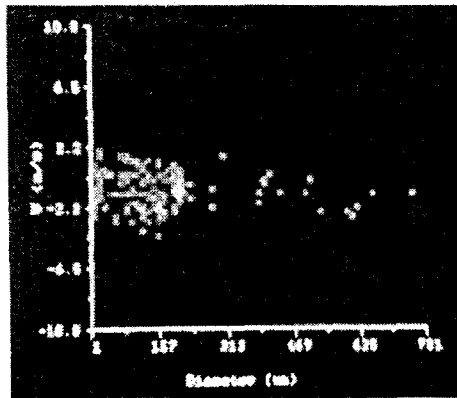


(b) v-directional velocity

Fig. 5 Average velocity distribution of cutting fluid aerosol via spin-off & splash mechanism (2000rpm, 100mm, 18lpm)



(a) 2000rpm, 100mm, 18 lpm



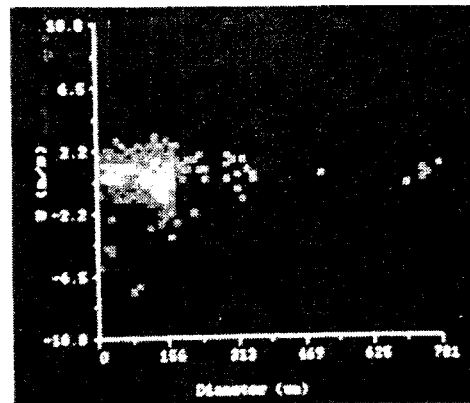
(b) 2000rpm, 100mm, 1 lpm

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

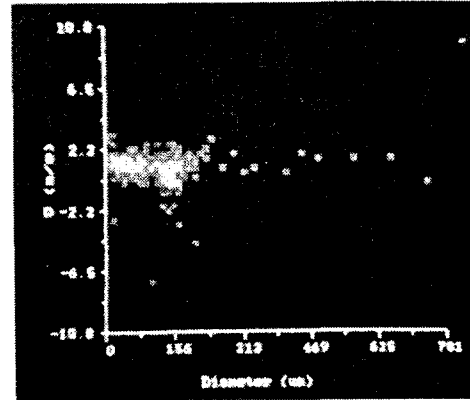
Figure 6과 Fig.7에는 각 미립화기구에 의한 절삭유 에어로졸 입경과 속도 분포의 상관성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, Dual-PDA로 $0.4\mu\text{m} \sim 800\mu\text{m}$ 의 범위의 절삭유 에어로졸이 측정되었으며, 동일 회전속도에서도 에어로졸 생성특성은 절삭유량 증가에 비례하여 미립화되는 에어로졸 발생량 증가는 물론, 일정 속도성분과 입경분포를 가진 에어로졸의 발생이 크게 촉진됨을 확인할 수 있다.

반면, 절삭유량이 작은 경우, 에어로졸 발생

량도 작고, 에어로졸 입경 분포도 전 측정범위에 산발적으로 분포하게 됨을 알 수 있다. 이러한 결과들은 실험조건에 따라 측정된 에어로졸로부터 계산되는 에어로졸 평균 입경결정에 큰 영향을 줄 수 있음을 의미한다.



(a) 2000rpm, 100mm, 18 lpm



(b) 2000rpm, 100mm, 1 lpm

Fig. 7 Correlation plot of cutting fluid aerosol size vs. velocity via spin-off & splash mechanism

또한, 회전분리 만에 의한 미립화(Fig.6(a))에서는 약 $70\mu\text{m}$ 이하 입경의 에어로졸이 주류를 이루는 반면, 충돌분산기구에 의한 미립화(Fig.7(a))의 경우 약 $150\mu\text{m}$ 입경의 에어로졸이 집중적으로 생성됨을 알 수 있다. 즉, 절삭유 액주와 공구와의 충돌로 인해 충돌분산기구

해석은 회전분리기구 의해 의한 미립자보다 큰 입경의 절삭유 에어로졸을 발생시키기 때문인 것으로 판단된다.

기계가공 공정에서 회전분리기구에 의해 발생하게 되는 절삭유 에어로졸은 다양한 입경분포를 보이므로, 평균입경 개념을 사용하여 에어로졸의 입경을 나타내었다. 본 연구에서는 미립화 분야에서 일반적으로 폭 넓게 사용되고 있는 산술 평균 입경(D_n)과 부피 대 표면적 평균 입경(D_v)를 사용하여 조건별 에어로졸 입경분포를 비교하였다.

Fig.8과 Fig.9 에는 회전분리기구에 의한 절삭유 에어로졸의 평균입경 변화를 나타내었으며, 공작물회전수가 증가할수록 미립화가 촉진되어 더욱 작은 입경의 절삭유 에어로졸이 발생함을 알 수 있다. 또한, 절삭유량 증가에 따른 각 회전속도별 평균입경 차이는 크지 않으나, 저 회전속도일수록 유량증가에 비례하여 입경이 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다.

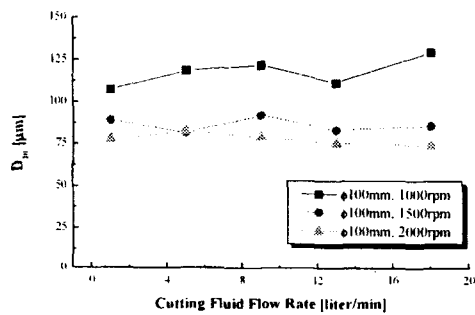


Fig. 8 Variation of cutting fluid aerosol size with respect to cutting fluid flow rate via spin-off mechanism

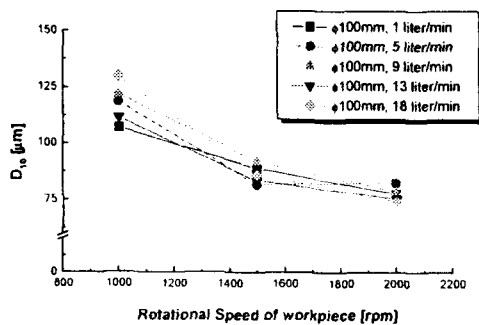


Fig. 9 Variation of cutting fluid aerosol size with respect to rotational speed of workpiece via spin-off mechanism

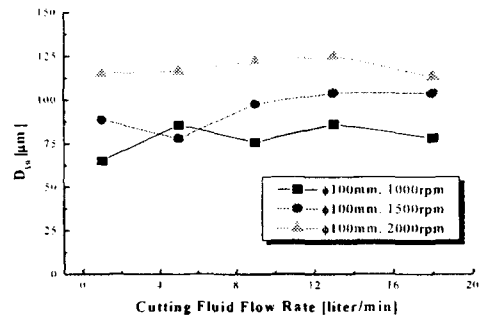


Fig. 10 Variation of cutting fluid aerosol size with respect to cutting fluid flow rate via spin-off & splash mechanism

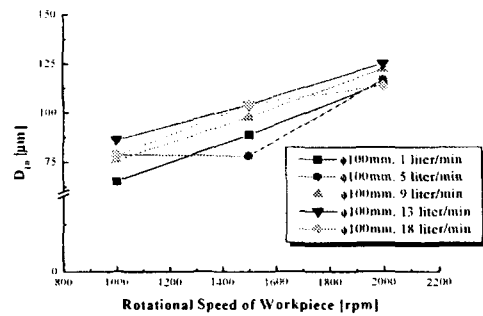


Fig. 11 Variation of cutting fluid aerosol size with respect to cutting fluid flow rate via spin-off & splash mechanism

Fig.10과 Fig.11에는 회전 및 충돌분산에 의한 절삭유 에어로졸의 평균입경 변화를 나타내었으며, 공작물회전수와 유량이 증가할수록 평균입경이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 Fig.7에서 분석한 바와 같이, 절삭유 액주와 공구간의 충돌분산 현상과 코팅액막층의 잔류 절삭유와의 재충돌로 인한 반발 미립화가 촉진되기 때문이며, 발생하는 에어로졸은 약 100µm 이상인 것으로 확인되었다.

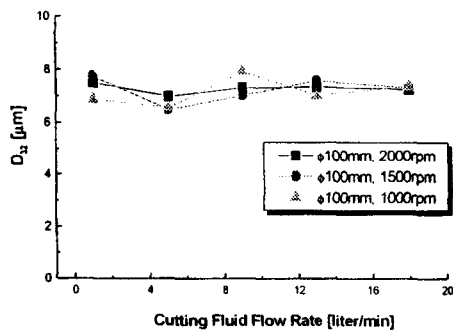
즉, 절삭유 에어로졸 입경은 회전원심력의 영향을 가장 크게 받게 되므로 공작물회전수 증가에 반비례하여 작아지는 특성을 나타낸다. 또한, 공구와의 충돌분산이 일어나는 조건에서

는 종돌반발에 의한 에어로졸 입경이 솟수 회전분리반에 의한 입경보다 크게 나타나며, 회전원심력, 유량등의 조건과 결합하여 에어로졸 입경에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.

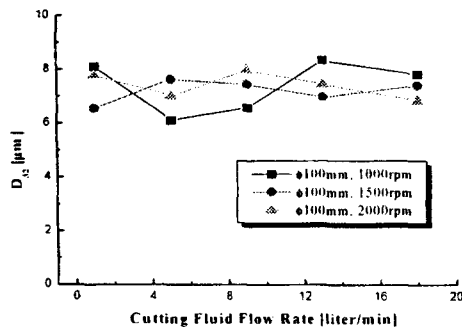
4.2 절삭유 에어로졸 농도 분석

국내외 대기오염 환경기준에서는 대기중에 떠다니는 입자상 오염물질 중 인체가 호흡을 통해 폐 내로 흡입될 수 있는 입자를 호흡기성 입자 (RSP: respirable suspended particulate) 로 규정하고 평균입경 $10\mu\text{m}$ 이하의 에어로졸 (PM10)을 관리대상으로 하고 있다.

또한, 미국 NIOSH에서 금속가공작업장내 입자상 오염물질의 농도기준을 설정하고, 환경, 위생 및 안전측면에서의 대기환경영향을 평가하기 위한 양적인 지표로서 공기 중 에어로졸 허용노출 농도를 1998년 $0.5\text{ mg}/\text{m}^3$ 로 규정·개정하였으며, 작업환경개선을 위한 권고사항으로 강력히 추진하고 있다.¹²⁾



(a) spin-off mechanism



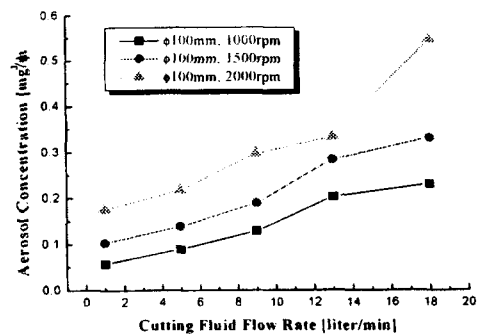
(b) spin-off & splash mechanism

Fig. 12 Variation of cutting fluid aerosol size less than $10\mu\text{m}$ with respect to cutting fluid flow rate

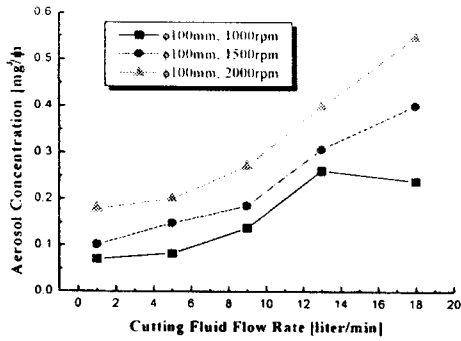
Fig.12에는 본 실험에서 측정된 PM10 입경 변화와 실험조건과의 관계를 나타낸 결과로서, 본 실험의 최소조건인 1000rpm, 1 lpm 조건에서도 PM10 미립자가 발생됨을 알 수 있으며, $D_{p0.5}$ 값이 약 $6\mu\text{m}\sim 8\mu\text{m}$ 범위의 에어로졸이 발생되고 있다. 측정된 전범위 에어로졸중 PM10 입경의 에어로졸은 약 10% 정도 포함되어 있음을 확인하였다.

Figure 13에 광산란식 분진계를 이용하여 측정된 절삭유 에어로졸 농도변화를 나타내었다. 농도변화는 절삭유량이 증가할수록, 주축 회전수가 증가할수록 절삭유 에어로졸의 질량 농도는 증가하는 경향을 보이고 있으며, 특히 유량이 증가할수록 미소 에어로졸의 발생빈도가 증가하므로 전체 농도증가 폭도 커짐을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 통상적인 공작기계(선삭 가공) 운전조건에서 발생하는 절삭유 에어로졸 농도는 NIOSH 권고치를 초과할 수 있음을 알 수 있으며, 따라서 이러한 환경위험상태를 정확히 알고 가공조건 설정 및 환경위험요소 제거 및 극소화 방안을 수립해야 할 것으로 판단 된다.



(a) spin-off mechanism



(b) spin-off & splash mechanism

Fig. 13 Comparison of mass concentration of cutting fluid aerosol with respect to cutting fluid flow rate

5. 결론

본 연구에서는 기계가공공정 특성상 발생하게 되는 절삭유 에어로졸 거동특성을 알아보기 위하여 Dual-PDA를 이용하여 정밀측정과 분석을 실시하였다. 통상적인 가공조건에서 발생된 에어로졸은 호흡기 안전에 영향을 줄 수 있는 10 μ m이하의 에어로졸이 발생함을 알 수 있었으며, 공작물 주위에 존재하는 에어로졸 농도는 기준치를 초과할 수 있는 것으로 확인되었다. 본 연구결과를 통해 절삭유 에어로졸 발생에 의한 환경영향을 확인하였으며, 적절한 환경친화적 생산공정 개선 및 개발에 필요한 기본 자료로서 활용될 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

1. Pfeifer, T., Eversheim, W., Keonig, W., "Manufacturing Excellence", 1994.
2. U.S. Department of Health and Human Services, "Occupational Exposure to Metal working Fluids," NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) Publication, 1998, No.98-102.
3. Bennett, E. O., Bennett, D. L., "Occupational Airway Diseases in the Metalworking Industry," Trib. Int., 18/3, pp.169-176, 1985.
4. Howes, T. D., Tonshoff, H. K., Heuer, W., "Environmental Aspect of Grinding Fluids." Annals CIRP, 40/2, pp.623-630, 1991.
5. Yue, Y., Sutherland, J. W., and Olson, W. W., "Cutting Fluid Mist Formation in Machining via Atomization Mechanism," ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceeding of Symposium on Design for Manufacturing and Assembly, DE-Vol.89, pp.37-46, 1996.
6. 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.
7. Bayvel, L., Orzechowski, Z., "Liquid Atomization," Taylor & Francis, 1993.
8. Hwang, J., Chung, E. S., Liang, S. Y., "Experimental Analysis of Cutting Fluid Aerosol Behavior in Machining Process", Proceedings of the 7th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia, pp. 92-97, 2002.