

연삭가공에서 절삭유 에어로졸 측정평가에 관한 연구

황 준*, 황덕철⁺, 우창기⁺⁺, 정의식⁺⁺⁺

(논문접수일 2005. 5. 19, 심사완료일 2005. 7. 5)

A Study on the Analysis of Cutting Fluid Aerosol in Grinding Process

Joon Hwang*, Duk-Chul Hwang⁺, Chang-Ki Woo⁺⁺, Eui-Sik Chung⁺⁺⁺

Abstract

Machining is a one of the broadly used manufacturing process to produce the parts, products and various molds and dies. The environmental impact due to aerosol generation via atomization process is a major concern associated with environmental consciousness. This paper presents the experimental results to analyze the characteristics of cutting fluid aerosol generation in grinding process. Experimental results show that the generated fine aerosol which particle size less than 10micron appears near worker's breath zone under given operational conditions. The aerosol concentration is much higher enough to affect human health risk with its generated aerosol quantities. This quantitative analysis can be provided the basic knowledge for further research for environmentally conscious machining technology developments.

Key Words : Environmentally Conscious Machining(친환경 기계가공), Cutting Fluid Aerosol(절삭유 에어로졸), Grinding Process (연삭가공공정), Human Health Risk(인체건강위험)

1. 서론

최근, 환경에 관련된 국제규제는 공정 및 생산방법(PPMS : Processes and Production Methods) 자체에 대한 규제를 시작하였으며, 이러한 규제움직임은 유럽시장을 중심으로 세부지침이 마련되면서, 국내 산업에 미치는 영향이 가히 크

다 할 수 있다^(1,2). 즉, 생산 공정에 사용되는 원부자재는 물론, 공정 중에 발생할 수 있는 각종 환경오염물질에 대한 규제와 감시, 개선을 요구하는 내용을 골자로 하는 만큼 보다 체계적인 청정생산기술의 개발이 더욱 요청되고 있다. 본 연구에서는 제품 및 금형가공시 최종단계의 정밀도 향상을 위해 폭넓게 적용되고 있는 연삭공정에서 사용되고 있는 절삭유에

* 충주대학교 기계설계학과 (jhwang@chungju.ac.kr)
주소: 380-702, 충북 충주시 이류면 검단리 123

+ 인천대학교 대학원 기계공학과

++ 인천대학교 기계공학과

+++ 한밭대학교 기계설계공학과

의해 발생하는 절삭유 에어로졸(cutting fluid aerosol)을 대상으로 하여, 정밀측정을 통한 에어로졸 발생 및 거동특성을 분석·고찰하고자 한다.

연삭공정에서 절삭유 사용에 따라 발생하는 미세한 에어로졸은 작업자의 호흡기 안전, 작업장 내 대기오염 악화 등의 주요 원인이 되고 있으며, 미세 입자들은 그 제거 및 제어가 쉽지 않은 특성을 가지고 있다. 특히, 이러한 에어로졸의 적절한 제거 및 제어방법을 도출하기 위해서는 발생하는 에어로졸의 특성분석이 반드시 필요하다 할 수 있다.

이와 관련하여 선진국을 중심으로 절삭유 에어로졸에 대한 폐해가능성에 대한 연구결과가 보고^(3~6) 되었으며, 작업장내 에어로졸 노출농도를 권고하고 있다⁽⁷⁾. 또한, 국내에서도 환경친화적 생산기술 개발과 관련하여 절삭유 에어로졸 발생에 대한 문제점들이 소개되어 지속적인 연구가 진행되고 있다^(8,9). 위와 같은 접근은 환경, 위생, 안전(EHS : Environment, Health, Safety) 측면을 고려한 공정 및 생산방법 개선 및 개발에 적용할 수 있는 과학적인 자료를 제공할 수 있으리라 판단된다.

2. 절삭유 에어로졸 생성 메카니즘

절삭유는 공작기계 및 절삭 메카니즘에 의해 매우 복잡한 형태의 에어로졸 생성이 이루어지며, 이러한 에어로졸 생성 메카니즘은 액체미립화이론에 근거하여 물리적 개념정립과 측정기법을 이용하여 에어로졸의 입경(aerosol diameter)과 농도(concentration) 값으로 에어로졸 생성특성을 정량화할 수 있다.

Fig. 1에는 절삭유 에어로졸 생성기구를 설명하는 개략도로서, 크게 3가지 메카니즘으로 나뉘어진다. 첫째, 스톱표면상의 절삭유가 연삭숫돌의 회전원심력으로 인해 반경방향으로 튕겨나가면서 회전분리(spin-off mechanism)되어 미립화(atomization)되는 에어로졸 생성기구와 둘째, 공구나 공작물에 절삭유가 충돌하면서 운동량 전달로 인해 미립화되는 충돌분

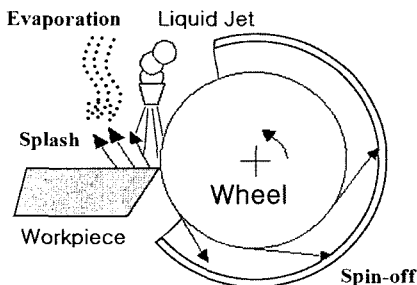


Fig. 1 Aerosol generation mechanism of cutting fluid in grinding process

산기구(splash mechanism), 셋째, 높은 절삭온도의 절삭점에 공급된 절삭유가 접촉하면서 기화되는 증발기구(evaporation mechanism) 기구로 나누어 설명할 수 있다^(5,6,8,9).

절삭유 에어로졸 생성은 가공조건과 사용되는 절삭유의 물성에 크게 영향을 받게 될 것이며, 절삭유량, 스톱회전수, 연삭 스톱돌직경 등과 직접적인 관계가 있을 것이다. 한편, 미립화된 에어로졸은 주변 환경조건과 외란으로 인해 에어로졸간의 충돌, 융합, 분리 등의 복잡한 거동을 갖을 수 있다. 따라서 측정시에 이와 같은 오차성분 영향을 낮추고, 측정정밀도를 높일 수 있는 측정장치 구성 및 측정방법의 마련이 반드시 필요하다.

3. 실험장치 구성 및 실험방법

에어로졸의 측정방법에는 여러 가지 방법론이 적용가능하나, 특히 생성된 에어로졸 형상이 외곽됨이 없이 측정할 수 있는 방법이 필요하며, 본 연구에서는 위상도플러 효과를 이용하여 정밀측정이 가능한 Dual-PDA(Dual Particle Dynamics Analyzer, Dantec Invent, Germany) 측정장치를 적용하여 연삭공정에서의 절삭유 에어로졸 발생거동을 측정·분석하였다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이, Dual-PDA 측정장치는 Ar-Ion 레이저장치로부터 생성된 U, V 레이저광이 발광부(transmitter)로부터 주사되어 측정공간(target volume)을 3차원 공간 상에 생성시키며, 이때 측정공간을 통과하는 에어로졸의 입경과 농도를 실시간으로 측정하고, 그 결과를 컴퓨터상에 자동저장시켜 분석할 수 있도록 한다. 특히, 본 측정 장치는 흡입식 에어로졸 측정방식과 비교할 때 에어로졸이 흡입관을 통과하면서 발생할 수 있는 에어로졸의 형태외곡과 흡입관의 누적에 의한 측정오차를 최소화할 수 있다는 장점을 갖고 있어, 측정 신뢰도를 높이는데 도움이 될 수 있다.

실험에 사용된 절삭유는 수용성 W2종을 5% 농도로 희석하여 절삭유 노즐을 통해 최대 18l/min 으로 절삭유를 공급하면서 공구연삭방법으로 200mm 직경의 연삭숫돌을 사용

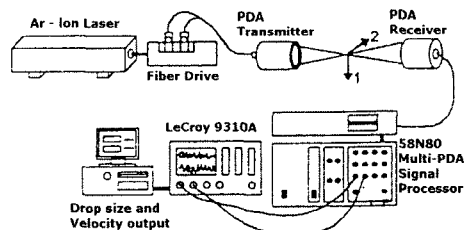


Fig. 2 Dual-PDA system for cutting fluid aerosol measurement

하여 슷돌회전속도 1000rpm~3000rpm 까지 변경조건으로 연삭가공을 실시하면서 이때 생성되는 에어로졸의 입경, 속도, 농도를 슷돌축 중심 상단 500mm 위치에서 실시간으로 측정하였다. 특히, 생성된 에어로졸이 외부 공기흐름 등에 의해 비정상적으로 산란되는 것을 방지하기 위하여 실험장치 주변에 검사체적을 형성하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 에어로졸 입경 및 확산속도 분포 특성

절삭유 에어로졸의 생성확산특성은 회전기구(spinn-off)만 에 의한 에어로졸 거동과 회전 및 충돌분산기구의 복합기구 (spinn-off/splash)에 의한 거동으로 나누어 실험하고, 측정, 고찰하였다.

먼저, Fig. 3에 나타난 바와 같이 측정된 에어로졸은 다양한 입경분포를 갖는 것이 일반적이므로 평균입경 개념을 사용하여 에어로졸의 입경을 나타내었다. 본 연구에서는 산술 평균 입경(arithmetic mean diameter, D_{10}) 과 부피 대 표면 적 평균입경(Sauter mean diameter(SMD), D_{32})를 사용하여 에어로졸 입경과 분포를 비교하였다.

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

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

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

여기서, D 는 입자직경, n 은 빈도수를 의미한다.

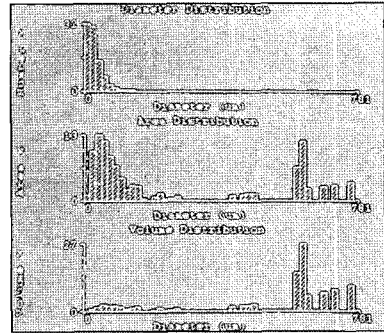
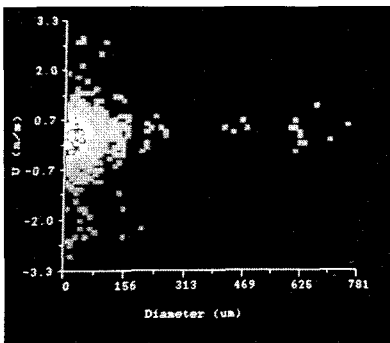


Fig. 3 Comparison of cutting fluid aerosol distribution in terms of diameter, surface area, volume of cutting fluid aerosol

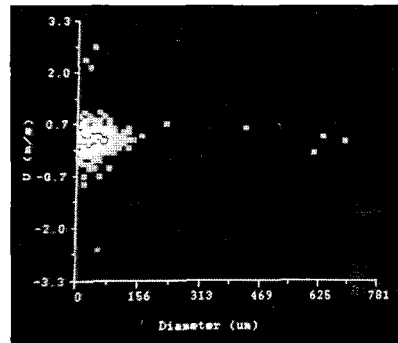
Fig. 4와 Fig. 5에는 절삭유량 변화에 따른 절삭유 에어로졸의 입경분포와 평균속도 분포의 상관도를 나타낸 결과이다. 절삭유 에어로졸 생성기구에 따라 속도 분포가 다른 형태로 나타남을 확인할 수 있다.

회전분리 기구에 의해 생성된 절삭유 에어로졸 평균속도는 u-(수직) 방향이 평균 0.2m/s, v-(수평)방향이 약 0.04m/s의 속도로 공기중에 확산되고 있음을 알 수 있으며, 회전분리기구와 충돌분산기구에 의한 에어로졸 평균속도는 u방향 -0.18m/s, v방향 0.0046m/s로 확산됨을 확인할 수 있다.

연삭공정에서 발생하는 절삭유 에어로졸 입경의 90% 이상이 100 μ m 이내의 에어로졸 입경을 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 동일 연삭스톨 회전속도에서도 절삭유량의 변화에 따른 에어로졸 발생특성이 큰 차이를 보이고 있으며, 절삭유량이 증가할수록 절삭유 에어로졸의 전체 발생량 증가는 물론, 일정 속도성분과 미세 입경을 갖는 에어로졸 발생이 크게 활성화되고 있음을 확인할 수 있다.

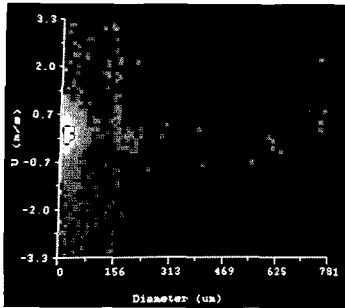


(a) 3000rpm, ϕ 200, 18l/min

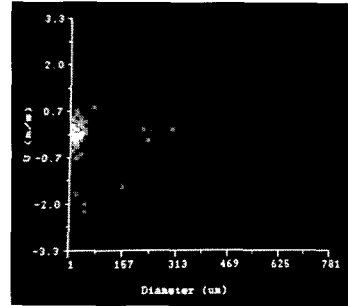


(b) 1000rpm, ϕ 200, 18l/min

Fig. 4 Correlation between cutting fluid aerosol diameter and velocity distribution via spin-off mechanism



(a) 3000rpm, φ200, 18l/min



(b) 1000rpm, φ200, 18l/min

Fig. 5 Correlation between cutting fluid aerosol diameter and velocity distribution via spin-off/splash mechanism

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

Fig. 6~Fig. 9에 나타난 바와 같이, 절삭유 에어로졸의 산술평균입경(D_{10})은 연삭숫돌 회전수가 증가할수록 미립화가 촉진되어 더욱 작은 입경의 절삭유 에어로졸이 발생함을 알 수 있다. 한편, 절삭유량 변화자체에 따른 절삭유 에어로졸 입경 변화는 상대적으로 크지 않으나, 저속의 숫돌회전수에서는 절삭유량이 증가할수록 절삭유 에어로졸 입경은 다소 증가하는 경향을 나타낸다.

특히, 회전분리기구와 충돌분산기구가 같이 작용되는 절삭유 미립화 과정 중에서 실험조건(연삭숫돌 회전수 : 1000 rpm, 공급절삭유량 5l/min 이하)에서는 절삭유의 직접충돌에 의해 상대적으로 큰 입경의 절삭유 에어로졸이 측정되었다. 이러한 절삭유 에어로졸은 발생빈도 측면에서나 또는 작업자 안전측면에서 그다지 큰 위험도나 영향도가 작으며, 그 외의 조건에서 발생하는 절삭유 에어로졸은 회전분리기구에 의해 발생하는 절삭유 에어로졸 입경과 유사한 경향을 나타내고 있다.

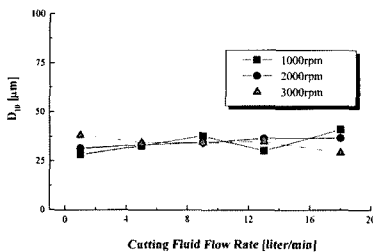


Fig. 6 Comparison of D_{10} of cutting fluid aerosol with respect to cutting fluid flow rate via spin-off mechanism

국내의 대기오염 환경기준에서는 대기 중에 부유하는 입자상 오염물질 총량을 총부유 에어로졸(total suspended particulate, TSP) 라고 규정하고 있으며, 인체가 호흡을 통해 폐내로 들어올 수 있는 에어로졸인 호흡기성 에어로졸(respirable suspended particulate, RSP) 라는 개념으로 PM₁₀ (particulate matters less than 10 μ m as an aerodynamic diameter)을 규정하고 있다.

본 실험에서 측정된 절삭유 에어로졸 중에서 운전조건에 따른 평균입경 10 μ m 이하의 에어로졸 발생특성을 정리해보면 Fig. 10과 같다.

이상의 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 회전분리기구 및 충돌분산기구에 의해 발생한 절삭유 에어로졸의 입경은 $D_{32} = 7\mu\text{m} \sim 8\mu\text{m}$ 수준의 작은 에어로졸 발생특성을 보이고 있다.

Dual-PDA를 이용한 측정범위 최대 800 μ m 까지에서 측정된 전체 절삭유 에어로졸중 평균입경 10 μ m 이하 PM₁₀에 해당하는 절삭유 에어로졸은 평균 42.5%에 해당하는 수치를 나타냈으며, 작업장내 인체호흡 시 유해한 호흡기성 에어로졸 발생으로 인해 작업자의 호흡기를 통해 체내로 쉽게 유입될 수 있어 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

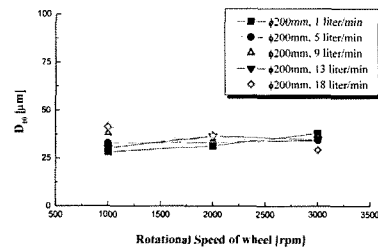


Fig. 7 Comparison of D_{10} of cutting fluid aerosol with respect to rotational speed of workpiece via spin-off mechanism

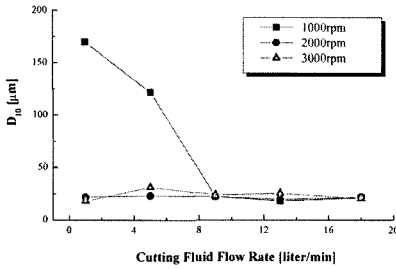


Fig. 8 Comparison of D_{10} of cutting fluid aerosol with respect to cutting fluid flow rate via spin-off/splash mechanism

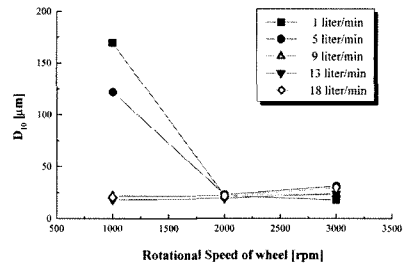
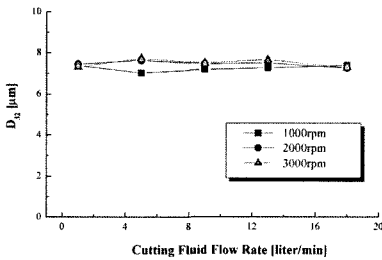
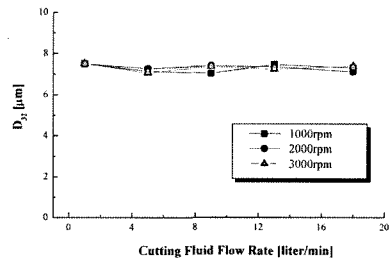


Fig. 9 Comparison of D_{10} of cutting fluid aerosol with respect to rotational speed of workpiece via spin-off/splash mechanism



(a) spin-off mechanism



(b) spin-off/splash mechanism

Fig. 10 Comparison of D_{32} of cutting fluid aerosol(PM₁₀ criteria) with respect to cutting fluid flow rate

4.2 에어로졸 농도 분포 특성

운전조건에 따라 발생하는 절삭유 에어로졸의 특성, 즉 에어로졸 입경분포, 입경별 입자수, 주변 환경조건에 따른 외란 등에 의해 매우 복잡한 특성을 나타내는 것이 미립화 기구인 만큼, 적절한 농도 기준과 단위의 설정이 중요하다.

미국 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 금속가공작업장내 입자상 오염물질의 농도기준을 설정하고, 환경, 위생 및 안전측면에서의 대기환경영향을 평가하기 위한 양적인 지표로서 공기중의 에어로졸 허용 노출 농도 권고치를 1998년 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 로 규정 개정되었으며⁽⁷⁾, 이러한 기준은 점차적으로 강화할 계획을 가지고 있다.

본 실험에서 측정된 절삭유 에어로졸의 질량농도를 Fig. 11에 나타내어 그 특성을 비교하였다. 발생한 에어로졸은 에어로졸의 입경분포와 빈도에 따라 에어로졸이 공기 중에 분산되는 특성은 매우 복잡해지므로 실제 측정되는 전체 농도에 충분히 영향을 줄 수 있다.

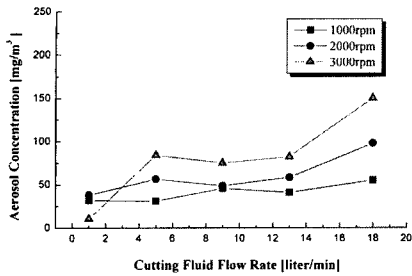
그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭유량이 증가할수록, 슛돌회전수가 증가할수록 절삭유 미립화가 촉진되어 절삭유 에어로졸의 질량농도는 증가하는 경향을 나타낸다. 회전분리 기구에 의한 절삭유 에어로졸 농도는 슛돌회전수와 유량

에 점진적으로 비례하는 경향을 보이며, 충돌분산기구가 포함된 실험에서는 2000rpm, 5l/min 조건 이상에서 농도값이 급증하는 경향을 보이고 있다. 또한, 절삭유 에어로졸 농도변화는 고속회전 조건일수록 절삭유량에 따른 영향을 크게 받게 되는 것은 회전분리 기구에 의한 절삭유 미립화 영향이 충돌분산기구에 의한 경우보다 크게 작용하기 때문으로 판단된다.

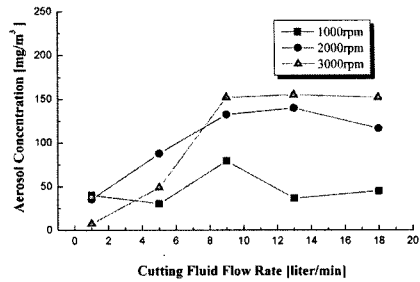
본 실험에서 채택한 최저 운전조건 1000rpm, 1l/min의 절삭유 사용조건에서도 이미 NIOSH의 권장규정치를 넘는 농도값은 보이고 있다. 이러한 결과는 선삭공정에서의 실험결과와 비교해 볼 때 최대 50배 이상의 절삭유 에어로졸 농도 발생 증가를 나타내고 있으며, 절삭유 에어로졸 발생에 대한 적절한 대응책 마련이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 연삭공정에서 발생하는 에어로졸을 정밀 측정장치인 Dual-PDA 시스템을 이용하여 측정하여 절삭유 에어로졸 거동특성을 고찰하였다. 환경, 위생, 안전(EHS) 측면에서 절삭유 에어로졸의 발생은 반드시 개선되어야 할 사안이며, 본 실험결과, 측정범위 최대 $800\mu\text{m}$ 까지에서 측



(a) spin-off mechanism



(b) spin-off/splash mechanism

Fig. 11 Comparison of mass concentration of cutting fluid aerosol with respect to cutting fluid flow rate

정된 전체 절삭유 에어로졸중 평균입경 $10\mu\text{m}$ 이하 PM_{10} 에 해당하는 미소 호흡기성 에어로졸의 높은 발생율로 인해 인체호흡 시 유해한 호흡기 안전에 나쁜 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 또한, 농도측정결과도 권고 기준과 비교하여 매우 높은 값을 나타내고 있어 매우 위험할 수 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구결과는 그동안 정성적 또는 경험적 측면에서 알고 있었던 절삭유 에어로졸 발생으로 인한 위험성을 보다 정량적으로 과학적으로 알 수 있는 기회를 마련하였으며, 향후 효과적인 절삭유 사용 및 제어방안 마련에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구결과는 충주대학교 학술진흥연구비의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Pfeifer, T., Eversheim, W., and König, W., 1994, *Manufacturing Excellence*, Chapman & Hall, pp. 517~521.
- (2) UNEP(United Nations Environment Programme), 2002, *Cleaner Production Global Status Report*, Global Environment Outlook.
- (3) Bennett, E. O., and Bennett, D. L., 1985, "Occupational Airway Diseases in the Metal working Industry," *Trib. Int.*, 18/3, pp. 169~176.
- (4) Howes, T. D., Tonshoff, H. K., and Heuer, W., 1991, "Environmental Aspect of Grinding Fluids," *Annals of CIRP*, 40/2, pp. 623~630.
- (5) Yue, Y., Sutherland, J. W., and Olson, W. W., 1996, "Cutting Fluid Mist Formation in Machining via Atomization Mechanism," *ASME IMECE DE-Vol89*, pp. 948~951.
- (6) Chen, Z., Wong, K., Li, W., Stephenson, D. A., and Liang S. Y., 2001, "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.
- (7) U. S. Department of Health and Human Services, 1998, "Occupational Exposure to Metalworking Fluids," *NIOSH Publication*, No. 98~102.
- (8) Hwang, J., and Chung, E. S., 2000, "Optimization of Cutting Fluids for Environmentally Conscious Machining," *Korean Society of Precision Engineering Annual Conference*, Vol. 2, pp. 948~951.
- (9) Hwang, J., Chung, E. S., and Hwang, D. C., 2003, "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.
- (10) Bayvel, L. P., and Orzechowski, Z., 1993, *Liquid Atomization*, Washington DC: Taylor & Francis.