

선삭에서 절삭유 미립화 생성 메카니즘의 실험적 검증

고태조*, 오명석**, 박성호***, 김희솔*

Experimental Verification of Aerosol Generation Mechanism for Cutting Fluid in Turning

Tae Jo Ko*, Myoung Seok Oh**, Sung Ho Park*** and Hee Sool Kim*

ABSTRACT

The mechanism of the aerosol generation generally consists of spin-off, splash, and evaporation/condensation. Most researchers showed some theoretical model for predicting the particulate size and generation rate without real cutting in turning operation. These models were based on the spin-off mechanism, and verified good for modeling the process. However, in real machining, the cutting tool destroys the spin-off process, and the majority of the mist is due to splash. In this paper, we show some experimental evidence that the aerosol generation mechanism in real machining should be explained with splash model as well as spin-off.

Key Words : Aerosol(입자), Spin-off(분리), Splash(분산), Number Concentration(수농도), Particle Size(입자크기), Turning(선삭)

1. 서론

Green Round로 대표되는 환경규제는 제조업에서도 예외는 아니어서 유럽이나 북미에서는 절삭 가공장에서 배출되는 폐기물에 대한 연구를 오래전부터 해오고 있다^[1]. 환경친화적인 연구는 대체적으로 절삭유를 사용하지 않는 건식절삭법^[2-3], 절삭유의 사용을 최소화하는 최소절삭유량 절삭법^[4-5], 절삭공정에 따라서 폐기물이 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위한 연구^[6], 절삭유의 사용으로 발생하는 미립자의 생성에 관한 연구^{[7-9][11-12]} 등으로 이루어져 있다.

일반적으로 절삭유는 절삭과정동안에 냉각작

용, 윤활작용, 칩처리작용, 그리고 부식방지작용을 하는 것으로 알려져있다. 이러한 이유 때문에 절삭유의 사용은 일부 특수한 가공을 제외하고는 거의 필수적이라고 할 수 있으나, 기계가공 중에 발생하는 절삭유의 미스트, 스모크, 냄새 및 기타 입자상 물질로 인하여 작업장의 대기 및 바닥의 오염을 유발하게 된다. 이러한 절삭유의 사용은 제품에 직접적인 악영향을 미치지 보다는 작업자의 건강에 매우 위험한 요소로 작용할 수가 있다. 즉, 산업체의 작업공정 중에 절삭유로 인해 발생하는 에어로졸 입자는 인체에 피부염, 호흡기를 통한 폐기종, 폐암 등의 각종 호흡성 질병을 유발시킨다고 알려져 있다^[10].

☞ 2002년 4월 9일 접수
* 영남대학교 기계공학부
** 영남이공대학 기계과
*** 경일대학교 기계공학부

공기 중 미립자의 농도와 관련하여 미국 OSHA (Occupational Safety and Health Administration)에서는 공기중 절삭유 의 허용노출농도를 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 제안하고 있으며, 이것은 1970년에 제정된 것으로 최근에는 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 안전허용기준치를 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 이하로 개정작업을 진행하고 있다. 절삭유 의 미립자라는 것은 절삭유 의 사용으로 인하여 발생하는 공중에서 부유할 수 있는 $20\ \mu\text{m}$ 이하의 크기 입자를 지칭하며, 통상 액절삭유 공급의 경우 $5\ \mu\text{m}$, 미스트 절삭유 공급의 경우 $1\ \mu\text{m}$ 크기의 입자가 대기를 오염시키게 된다. 이러한 의미에서, 기계가공 공정 중에서 절삭유 의 사용으로 인하여 발생하는 에어로졸 입자에 관한 연구는 매우 중요하다.

미립화과정은 액막 또는 액체제트가 액체의 운동에너지, 고속의 공기중에 노출, 회전 또는 진동하는 기구로부터 전달되는 기계적 에너지 등에 의해 분리되는 현상이다. 따라서 Liang, Yue 등은 액체 미립화 이론을 바탕으로 절삭유 미립자 발생메카니즘에 근거하여 미립자 직경 및 발생율에 대한 모델을 제시하였다^{[7][11-12]}. 이는 각각 분리(spin-off), 분산(splash), 증발(evaporation) 메카니즘으로 이루어져 있으며, 각각의 모델에 대해 타당성을 실험적으로 증명하고자 하였다. 이들의 연구는 주로 실제 절삭을 하지 않는 이상적인 모델인 회전하는 원통면을 따라 흐르는 액체의 분리 메카니즘으로 미립자의 농도와 미립자의 크기를 설명하고자 하였다. 그러나 실제의 절삭에서는 절삭공구의 간섭현상으로 인하여 분리 메카니즘으로 절삭유 의 미립화 과정을 규명하기에는 무리가 따른다.

따라서 본 연구에서는 절삭과 비절삭시에 절삭유 미립자를 실험적으로 측정하여 분리 메카니즘의 비중을 평가하고, 실제 절삭시 발생하는 미립자의 형성 메카니즘이 주로 분산과정에 의하여 발생함을 규명하고자 한다.

2. 미립자 발생 메카니즘

절삭유 미립자는 Fig. 1과 같이 분리, 분산, 증발과 응축에 의해 만들어진다^{[7][11-12]}. 이 중에서 증발과 응축에 의한 미립자 발생은 실험에 의하면 절삭유 속의 수분만 증발하고 대부분의 오일성분은 증발하지 않은 것으로 밝혀졌다^[12]. 따라서 절삭지점과 같이 극히 높은 온도영역의 경우를 제외하고는

증발에 의한 미립자 발생은 중요하지 않은 것으로 간주한다.

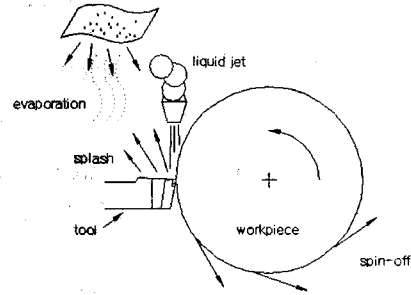


Fig. 1 Aerosol generation during machining

분리과정은 유량, 원심력, 표면장력, 중력, 그리고 공기의 저항에 의하여 Fig. 2와 같이 3가지 과정으로 나눌 수가 있다^{[7][12]}. 먼저 그림에서처럼 유량이 풍부할 때는 공기와 같은 대기중의 매체가 유체에 교란을 일으키고, 이에 따라서 유막을 파괴시켜 낙하시키게 되는데 이 과정을 유막형성모드라고 한다(구간 A-B).

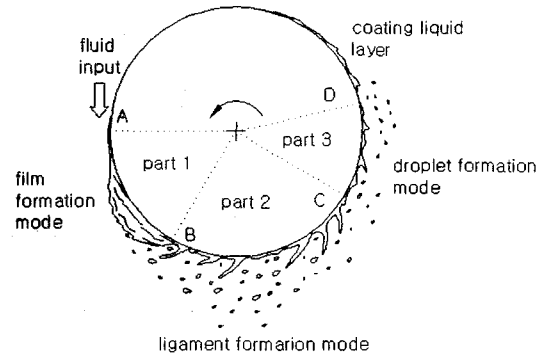


Fig. 2 Spin-off atomization process

다음은 물줄기 형성모드로서 유막형성모드보다 유량이 적은 경우로서, 원통면 주위를 따라서 불안정한 물줄기가 나타나면서 작은 물방울로 쪼개어진다(구간 B-C). 이 보다 유량이 적어지면 물방울 형성모드가 되는데, 이 경우는 얇은 액막의 표면장력이 원심력과 중력을 견디지 못하고 표면으로부터 떨어지면서 물방울이 생기게 되는데, 이때는 상대

적으로 균일한 크기의 방울이 형성된다(구간 C-D). 이후 절삭유는 점성력과 표면장력이 원심력과 중력의 영향을 이김으로써 공작물의 표면에 피복되어 얇은 박막의 층을 형성하여 표면에 남게된다(구간 D이후).

한편, 분산은 Fig. 3과 같이 절삭유 노즐로부터 공작물로 물방울이 접근할 때, 충격에 의한 운동에너지와 교란, 비행중 증발에 의해 발생한다¹⁷⁾. 분산에 의한 입자형성과정에서, 미립자는 액체 제트가 공작물이나 공구에 충돌한 후 바로 형성되는 것이 관측되기 때문에 이 과정은 물방울형성모드와 비슷한 메커니즘을 가진다고 가정할 수가 있다.

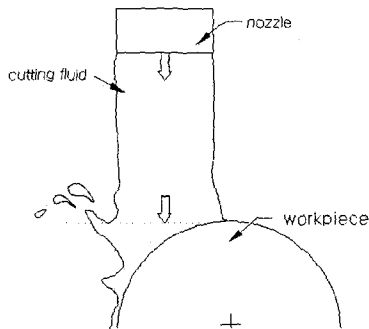


Fig. 3 Schematics of the cutting fluid splash process

3. 실험장치 및 방법

선삭가공 실험은 Fig. 4와 같이 수평형 CNC선반(DC-2, 대구중공업)을 이용하였고, 발생된 에어로졸 입자의 측정에는 입자계수기(Aerosizer DSP 3220, TSI)를 이용하여 절삭시의 입자의 농도, 크기, SMD, 단위 표면적, 질량부하(mass loading) 등을 측정하였다. 공작물의 직경은 60 mm, 절삭깊이는 1 mm, 이송속도는 0.2 mm/rev으로 고정하였으며, 공작물의 회전수는 각각 1,000, 2,000, 3,000 rpm으로 하였다.

사용한 절삭유는 Soluble type(물:절삭유 = 10:1)을 사용하였으며, 이때 절삭유량의 변화, 회전수 변화에 따른 에어로졸 입자의 발생 특성을 측정하였다. 각 실험조건에서 정상상태에 발생하는 에어로졸 입자의 크기 및 수농도(number concentration, particles/m³) 분포를 측정하기 위하여 측정 시간은 30초로 고정하였다. 실험에 사용한 입자 계수기는

0.2~200 μm까지 측정이 가능하며, 프로브는 내경이 8 mm인 튜브를 사용하였다.

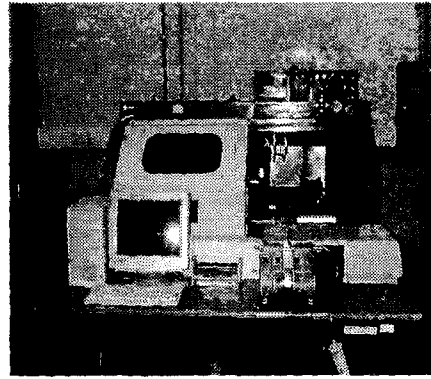


Fig. 4 Photograph of experimental apparatus

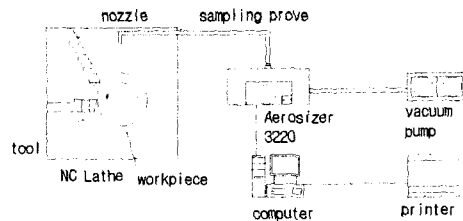


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

주어진 조건으로 절삭유를 공급하면서 가공을 하면 선반 내에서 발생된 에어로졸 입자가 부유하게 된다. 이 부유된 에어로졸 입자가 진공펌프에 의해 Probe를 통해서 입자계수기로 유입된다. 유입되는 공기유량은 2 l/min으로 일정하다. 한편, 절삭 가공 중에 발생하는 절삭유 에어로졸 입자의 발생은 측정위치에 따라 다르다. 특히 분리(spinn-off)가 지배적인 경우 공작물의 회전수 증가에 따라 에어로졸 입자의 최대발생지점은 달라지게 된다. 그러나 본 연구의 목적은 각 측정지점에서의 에어로졸입자 크기나 농도보다는 입자발생의 메커니즘을 규명하는 것이다. 따라서 측정프로브의 위치는 Fig. 5와 같이 에어로졸 입자의 관성이 배제될 수 있도록 가공물에서 충분히 수직방향으로 거리를 유지하여 등속흡입(isokinetic sampling)이 유지되도록 하였다.

본 실험에서 측정된 에어로졸 입자의 평균직경은 에어로졸 입자의 체적을 표면적으로 나눈 값인 SMD(Sauter Mean Diameter, volume-surface mean diameter)를 이용하였으며, 그 정의는 식(1)과 같다.

$$SMD = \frac{\sum n_i \times V(\text{volume})}{\sum n_i \times S(\text{surface})} = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \quad (1)$$

4. 실험결과 및 검토

본 연구에서는 기계가공 중에 발생하는 에어로졸 입자의 발생 메카니즘, 발생 크기분포 및 평균 입경 등에 대하여 실험적으로 관찰하였다. 실험실 내의 배경 입자 분포(background particle size distribution)는 미세 부유 입자로 크기는 0.6~0.8 μm 내외이며, 농도 또한 실험시의 농도에 비해 10% 이하로 매우 적어 실험결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하고 실험을 하였다.

먼저 Fig. 6은 절삭을 하지 않고, 공작물만을 1,000rpm으로 회전시키면서 공작물의 상부에서 절삭유를 공급할 때, 절삭유량이 500 l/min, 이송속도 0.2 mm/rev, 절삭깊이 1.0 mm인 상태에서 측정된 에어로졸 입자의 크기분포와 수농도 분포를 나타내는 측정결과의 한 예이다. 그림에서 가로축은 입자의 크기를 나타내며, 세로축은 각각의 크기 에 대한 수농도를 나타낸다. 그림에서 나타나있듯이 미립자는 1 μm 이하와 이상의 것이 동시에 정규 분포를 이루며 나타나는 2중분포 형태를 나타내는데, 이러한 결과는 다른 문헌에서도 나타난다고 보고되어 있다.^[12]



Fig. 6 Typical data output of Aerosizer for aerosol size distribution and concentration

Fig. 7은 상기 조건으로 실험을 하였을 때의 수농도와 입자크기를 주축의 회전수에 대하여 실험한 결과이다. 회전수가 증가함에 따라서 입자의 직경은 작아지게 되며, 그에 따라서 수농도가 증가함을 알 수가 있다. 이는 원심력의 증가에 기인함을 알 수가 있으며, 일반적으로 알려진 결과와 잘 일치한다.

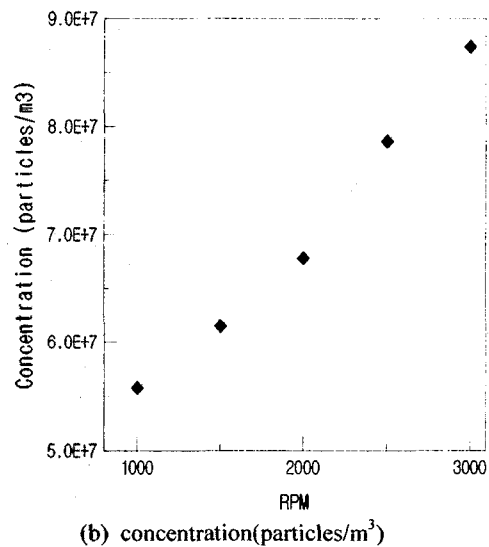
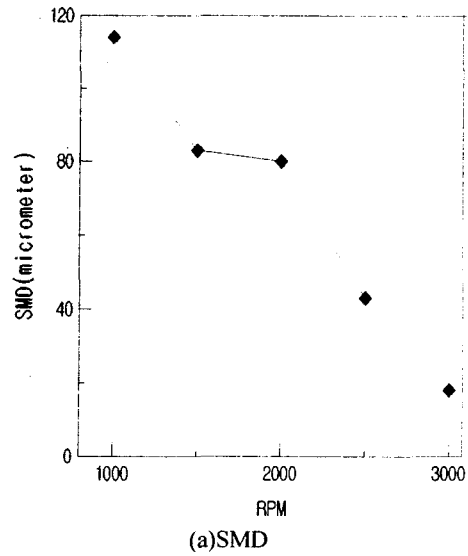


Fig. 7 Cutting fluid flow rate 0.5 l/min, Feed rate 0.2 mm/rev, Depth of cutting 1.0 mm

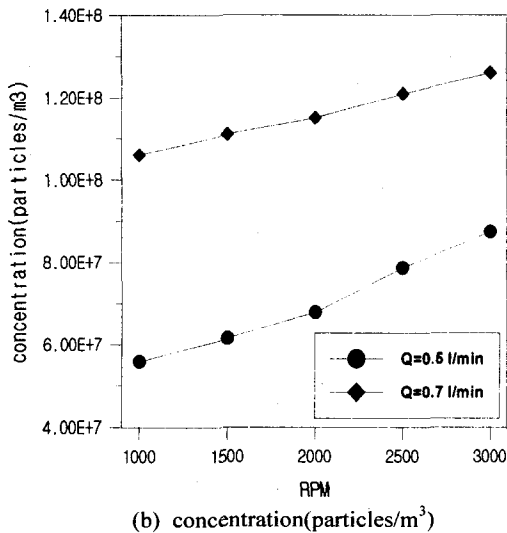
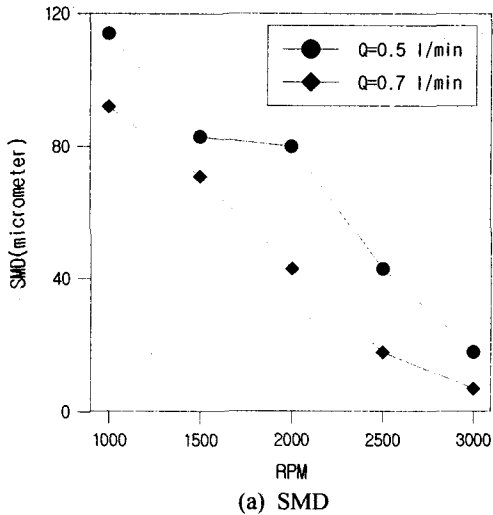


Fig. 8 Effect of rotating speed and flow rate on SMD of particle and concentration

한편, Fig. 8은 유량에 따른 영향을 평가하기 위하여 유량을 0.7 l/min로 증가하여 보았을 때를 비교한 결과이다. 그림에서와 같이 유량이 증가함에 따라서 입자의 크기가 증가하며, 수농도 또한 동시에 증가함을 알 수가 있다. 따라서 절삭공구를 사용하지 않고 순수하게 공작물만 회전시키면서 절삭유를 공급해보는 본 연구의 결과는 회전수나 유량의 증가에 따라서 수농도와 입자크기가 증가하고

있으며, 이는 분리의 영향을 지배적으로 받고 있음을 보이는 증거가 될 수 있다.

한편, Fig. 9는 절삭유의 공급량이 10 l/min, 15 l/min, 25 l/min일때 상기처럼 가공을 하지 않고 공작물만 회전시키는 경우와 절삭가공을 하면서 회전시키는 경우에 따라 수농도의 변화를 나타내고 있다. 가공을 할 경우가 하지 않을 경우보다 더 많은 입자가 발생되는 것을 알 수 있다.

가공하지 않을 경우에 입자의 농도는 회전수가 증가할수록 급격하게 증가하는데 반하여 가공을 할 때의 입자는 완만하게 증가를 한다. 본 결과에서 보듯이 가공의 경우나 비가공의 경우 모두 절삭유량이 증가할수록 입자의 수농도가 증가함을 알 수 있고, 같은 유량이라도 회전수의 변화에 따른 수농도도 증가함을 알 수 있다. 또한 절삭하는 경우는

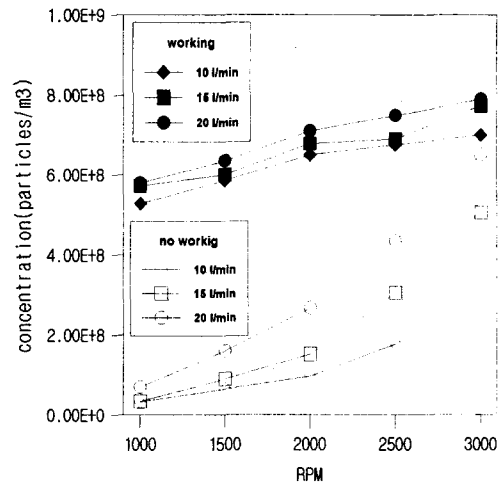
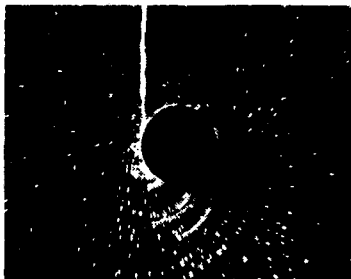


Fig. 9 Comparison of generated particle concentration with and without cutting

비절삭인 경우보다 수농도가 매우 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과에 대해 비절삭인 경우에 입자의 크기와 분포를 예측하기 위하여 분리현상만을 위주로 만든 입자생성 모델로는 설명하기가 어려워진다. 특히 회전수와 절삭유의 증가에 따라서 수농도의 증가율이 비절삭의 경우가 절삭의 경우보다 매우 빠르게 증가하는데, 이는 원심력의 증가에 의해 분리의 영향이 크게 지배받고 있음을 나타내고 있음을 보인다. 이처럼 SMD와 수농도가 회전수와 유량에 영향을 받는 것은 회전수가 증가할

수축 절삭유가 공작물의 표면에서 표면속도의 증가로 인하여 입자가 미립화가 되면서 입자의 직경이 작아지기 때문이다. 즉, 입자의 직경이 작아진다는 것은 SMD 관점에서는 입자의 체적을 입자의 직경의 표면적으로 나눈 것으로 입자의 직경이 작아질수록 SMD가 작아지는 것은 당연한 결과이다. 그리고 유량이 증가할수록 수농도가 증가하는 것도 절삭유가 노즐에서 분출되면서 공작물에 의한 충돌에 의한 것과 공작물 표면에서 절삭유 액막이 두꺼워짐에 따라 액막의 불안정성에 의한 미립화가 촉진되므로 절삭유량이 많을수록 입자의 수농도가 증가한다는 것을 알 수 있다.

그러나 절삭의 경우는 회전수의 증가에 따라서 증가의 경향이 덜한데 그 이유는 분리의 영향이 상대적으로 작기 때문이다. 따라서 절삭가공 시에는 분리의 영향보다는 분산의 영향이 지배적이며, 이 분산의 영향은 유량과 회전수에 따라서 상대적으로 작은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이 현상을 규명하기 위하여 절삭유의 비산현상을 비절삭시와 절삭중에 각각 고속카메라를 통하여 사진촬영을 하였다.



(a) Spindle rotation without cutting



(b) Cutting

Fig. 10 Two different status of mist generation

Fig. 10(a)는 절삭을 하지 않고 단지 주축만 회전하여 공작물을 회전시키는 경우이다. 사진을 관찰하여 보면 Fig. 2의 분리모델 그림과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 절삭을 하게 되는 순간 Fig. 10(b)와 같이 분리현상은 절삭공구 및 절삭칩에 의해 거의 파괴되고, 단지 Fig. 3과 같은 분산모델에 의해 절삭유가 미립화된다. 이러한 사진은 Fig. 9의 결과를 이해할 수 있도록 한다.

따라서 지금까지 발표된 분리현상에 의해 설명하고 있는 절삭과정중의 절삭유 미립화모델은 분산현상으로 설명하여야 함을 충분히 이해할 수가 있다.

5. 결론

1. 절삭유의 미립자는 절삭유량 및 공작물의 회전수에 따라서 영향을 받으며, 절삭유량이나 회전수의 증가에 따라서 평균직경은 작아지고 수농도는 증가하게 된다.

2. 절삭유 미립화 모델은 분리, 분산, 증발로 나눌 수가 있으나, 이미 발표된 대부분의 연구는 분리 메카니즘으로 미립화를 설명하고 있다. 그러나 절삭과정은 절삭날의 개입으로 인하여 절삭점에는 분리 메카니즘이 방해받으며, 절삭점 이외는 분리현상이 존재하므로, 절삭시에는 분산모델과 분리모델이 동시에 고려되어야 함을 알 수가 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구 지원사업(1999-2-304-003-3)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. G. Byrne, E. Scholta, "Environmentally clean machining process-A strategic approach," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 471-474, 1993.
2. F. Klocke, G. Eisenblatter, "Keynote papers : Dry cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 46, No. 2, pp. 519-526, 1997.
3. M. Jin, H. Noguchi, M. Murakawa, "Environmentally friendly dry cutting using heat absorption tool,"

- Transactions of NAMRI/SME, Vol. 29, pp. 235-242, 2001.
4. A. E. Diniz, "Minimal lubrication in the drilling process of aluminum silicon alloy," Proceeding of International Machining & Grinding Conference, Oct. 4-7, pp. 683-697, 1999.
 5. D. Hafenbraedl, S. Malkin, "Environmentally-conscious minimum quantity lubrication(MQL) for internal cylindrical grinding," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 28, pp. 149-154, 2000.
 6. S. J. Skerlos, R. E. DeVor, S. G. Kapoor, "Environmentally conscious disposal considerations in cutting fluid selection," Proceedings of the ASME Manufacturing Science and Engineering Division, MED-Vol. 8, pp. 397-403, 1998.
 7. Z. Chen, K. Wong, W. Li, S. Y. Liang, D. A. Stepenson, "Cutting fluid aerosol generation due to spin-off in turning operation: Analysis for environmentally conscious machining," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 123, pp. 506-512, 2001.
 8. 황준, 정의식, "환경친화적 기계가공을 위한 절삭유 최적화에 관한 연구," 한국정밀공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp. 948-951, 2000.
 9. 황준, 정의식, "환경 친화적 기계가공 기술에 관한 연구:선삭가공시 회전분리기구에 의한 절삭유 미립화와 환경영향," 한국정밀공학회지, Vol. 19, No. 3, pp. 73-79, 2002.
 10. C. R. Mackerer, "Health effects of oil mists: A brief review," Toxicology and Industrial Health, Vol. 5, pp. 429-440, 1989.
 11. Y. Yue, J. W. Sutherland, W. W. Olson, "Cutting fluid mist formation in machining via atomization mechanisms," Design For Manufacturing Assembly (ASME), DE-Vol. 89, pp. 37-46, 1996.
 12. Y. Yue, K. L. Gunter, D. J. Michalek, J. W. Sutherland, "An examination of cutting fluid mist formation in turning," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 27, pp. 221-226, 1999.1.