

선삭 가공시의 미스트 발생 특성

오명석*, 고태조**, 박성호***, 김희술**, 정종운****

Mist Formation Characteristics in Turning

Myung Seok Oh*, Tae Jo Ko**, Sung Ho Park***, Hee Sool Kim**, and Jong Woon Chung****

* 영남이공대학 기계과, ** 영남대학교 기계공학과, ***경일대학교 기계공학부, ****영남대학교 대학원 기계공학과

ABSTRACT

The mechanism of the aerosol(mist) 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 flow direction of the cutting fluid and generate the heat by the relative motion of between tool and workpiece, and so the mass loading of the mist is greatly increased as compared with non-cutting. In this paper, we show some experimental data that the mist formation characteristics of cutting is different from that of non-cutting.

Key Words : Aerosol(입자), Spin-off(분리), Splash(분산), Number Concentration(수농도), Mass loading(질량 농도), Particle Size(입자 크기), Turning(선삭)

1. 서론

Green Round로 대표되는 환경규제는 제조업에 서도 예외는 아니어서 유럽이나 북미에서는 절삭 가공공장에서 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] 등으로 이루어져 있다.

일반적으로 절삭유는 절삭과정동안에 냉각작용, 윤활작용, 칩처리작용, 그리고 부식방지작용 등의 유용한 기능을 하는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유 때문에 절삭유의 사용은 일부 특수한 가공을 제외하고는 거의 필수적이라고 할 수 있으나, 절삭 중에 발생하는 절삭유의 미스트, 스모크, 냄새 및 기타 입자상 물질로 인하여 작업장의 대기 및 바닥의 오염을 유발하게 된다. 이러한 절삭유의 사용은 1차적으로 제품에 직접적인 악영향을 미치지 보다는 2차적으로 작업자의 건강에 매우 위험한 요소로 작용할 수가 있다. 즉, 절삭작업과정 중 절삭유로 인해 발생하는 에어로졸 입자는 인체에 피부염, 호흡기를 통한 폐기중, 폐암 등의 각종 호흡성 질병을 유발시킨다고 알려져 있다[10].

공기 중 미립자의 농도와 관련하여 미국 OSHA(Occupational Safety and Health Administration)에서는 공기중 절삭유의 허용노출농도를 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 제안하고 있으며, 이것은 1970년에 제정된 것으로 1998년부터 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 안전허용기준치를 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 이하로 개정하였다[11]. 절삭유의 미립자라는 것은 절삭유의 사용으로 인하여 발생하는 공중에서 부유할 수 있는 $20\ \mu\text{m}$ 이하의 크기 입자를 지칭하며, 통상 액질삭유 공급의 경우 $5\ \mu\text{m}$ 미스트 절삭유 공급의 경우 $1\ \mu\text{m}$ 크기의 입자가 대기를 오염시키게 된다. 이러한 의미에서, 기계가공과정 중에서 절삭유의 사용으로 인하여 발생하는 에어로졸 입자에 관한 연구는 매우 중요하다.

미립화과정은 액막 또는 액체제트가 액체의 운동에너지, 고속의 공기 중에 노출, 회전 또는 진동하는 기구로부터 전달되는 기계적 에너지 등에 의해 분리되는 현상이다. 따라서 Liang, Yue 등은 액체 미립화 이론을 바탕으로 절삭유 미립자 발생 메카니즘에 근거하여 미립자 직경 및 발생율에 대한 모델을 제시하였다[7,9]. 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 메카니즘으로만 절삭유 미립자 과정을 규명하기에는 무리가 따른다.

따라서 본 연구에서는 저속 및 중고속 절삭 속도 범위에 걸쳐 절삭과 비절삭시의 절삭유 미립자를 실험적으로 측정하여 미스트의 발생 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

선삭가공 실험은 Fig. 1과 같이 수평형 CNC선반(Pro6, 대구중공업)을 이용하였고, 발생된 에어로졸 입자의 측정은 입자계수기(Aerosizer DSP 3220, TSI)를 이용하여 절삭시의 입자의 수, 농도, 크기, SMD, 단위 표면적, 질량 농도(mass loading) 등을 측정하였다.

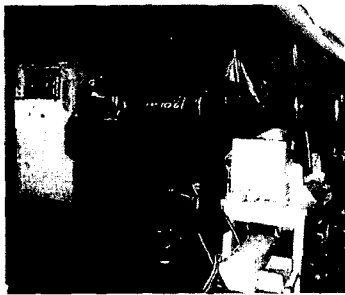


Fig. 1 Photograph of experimental apparatus

표 1은 절삭조건을 나타낸 것이다. 이러한 조건은 공구마모, 절삭력 및 표면조도에 대한 타 연구와 연구의 연관성을 갖도록 하기 위하여 조건을 서로 일치시킨 것이다. 이와 같은 조건으로 공작물, SM45C(Hrc89)에 대하여 Soluble type(물:절삭유 혼합비 = 10:1) 절삭유(W2종1호)를 사용하여 절삭깊이 1.5mm, 이송속도 0.15mm/rev으로 일정하게 하면서 절삭유량의 변화, 절삭속도, 및 직경의 변화에 따른 에어로졸 입자의 발생 특성을 측정하였다.

입자 측정 시간은 절삭 및 비절삭시에 각각 20초로 2회씩(1차는 절삭 및 절삭유 공급중, 2차는 절삭후 및 절삭유 공급 중지후 측정)동일한 조건으로 측정하였다. 실험에 사용한 입자 계수기는 0.2~200 μm까지 측정이 가능하며, 프로브는 내경이 8 mm인 튜브를 사용하였다. 입자계수기는

유입되는 에어로졸 입자에 의한 오차를 방지하기 위하여 입자계수기 유입부에 T-형 분기관을 사용하였다.

Table 1 Experimental conditions.

Work	Cutting Tool	Cutting speed (m/min)	Flow rate of cutting fluid(l/min)
SM45C φ 40 φ 60 φ 80	PCLNR2525 (HOLDER)	80	20*
	CNMG120404FG -TT2500 (INSERT)	110	10*
		140	0.5**
		170	(PORT DIAMETER : * : 11, ** : 2 mm)
	200		

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 일정하며, 프로브의 위치는 절삭유 공급노즐이나 절삭영역으로부터의 영향을 배제할 수 있고, 작업자가 선반 문을 열었을 때 작업자의 호흡기관과 거의 일치하는 위치인 공작물 중심에서 225mm 상부위치 및 공작물 자유단에서 주축쪽으로 10mm인 위치에 설치하였다. 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.

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

3. 실험결과 및 검토

본 연구에서는 기계가공 중에 발생하는 에어로졸 입자의 발생 메카니즘, 발생 크기분포 및 평균입경 등에 대하여 실험적으로 관찰하였다. 실험실 내의 배경 입자 분포는 미세 부유 입자로 크기는 0.6~0.9 μm 내외이며, 농도 또한 실험시의 농도에 비해 10% 이하로 매우 적어 실험결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하고 실험을 하였다.

먼저 Fig. 2는 직경60mm인 공작물을 절삭속도 140m/min, 절삭깊이 1.5mm, 이송속도 0.15mm/rev 및 절삭유량이 0.5 l/min인 조건으로 25초 동안 절삭 후 20초 동안 측정된 에어로졸 입자의 크기분포와 수농도(concentration, particles/m³) 분포를 나타내는 측정결과와 한 예이다. 그림에서 가로축은 입자의 크기를 나타내며, 세로축은 각각의 크기에 대한 수농도를 나타낸다. 그림에서 나타나 있듯이 미립자는 1 μm이하와 이상의 것이 동시에

정규분포를 이루며 나타나는 2중분포 형태를 나타내는데, 이러한 결과는 다른 문헌에서도 나타난다고 보고되어 있다[9].

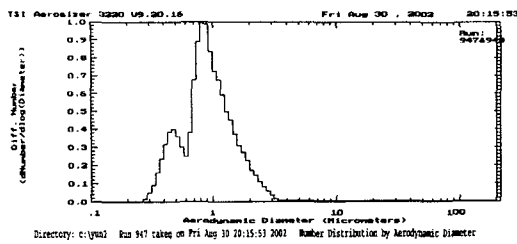


Fig. 2 Typical data output of Aerosizer for aerosol size distribution and concentration

Fig. 3의 좌측은 건식 및 습식 절삭시, 우측은 비절삭시에 대한 직경 및 유량별 절삭속도의 변화에 따른 수농도의 변화를 각각 나타내는 것이다. 절삭시에는 건식인 경우가 수농도가 가장 낮게 나타났으며 절삭중 보다는 절삭후의 수농도가 높게 나타났다. 또한 절삭속도의 증가에 따라서 수농도는 증가하는 경향을 나타내고 있는데 이는 이미 알려져 있는 일반적인 내용과 잘 일치하는 것이다. 유량의 변화에 따른 영향은 저속 절삭시는 유량이 많을수록 수농도가 낮게 나타났으나 중고속 이상의 절삭에서는 유량의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

우측의 비 절삭시의 자료를 보면 절삭시에 비하여 상당히 낮은 수준의 수 농도가 생성되었고 그 성장 특성이 상이하여 비 절삭시의 데이터를 절삭시에 사용할 수 없음을 의미하는 것이라 할 수 있다. 이렇게 절삭시의 수 농도가 높게되는 이유는 절삭공구의 개재에 의한 절삭유외의 광범한 분산으로 인한 분리 기구에 의한 수 농도의 증대와 공구와 칩과의 충돌 및 절삭열에 의한 수 농도의 증대에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 절삭시에 있어서의 유량별 직경과 절삭속도에 따른 질량 농도의 변화 특성을 나타낸 것이다. 좌측, 중앙, 우측은 절삭유량 20, 10 및 0.5 //min인 경우에 대해서 각각 나타낸 것이다. 20 //min인 경우에는 동일 원주속도에서 직경에 의한 영향보다는 회전수 증대의 영향을 많이 받았음을 알 수 있으나, 10 및 0.5 //min에서는 회전수 대비 직경의 영향을 분석하기가 어려운 것으로 나타나 있으며, 이는 절삭유량이 적을수록 실험 환경의 변화에 민감하게 반응하여 발생된 현상으로 생각되며, 차후 보다 엄격한 실험 환경하에서 재검증을 해 보아야 할 것으로 생각된다.

또한 어느 경우나 절삭중에 비하여 절삭후의 질량 농도가 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 비 절삭시에 대해 이미 알려진 현상과 잘

일치하는 것이다.

Fig. 5은 절삭시에 있어서 공작물 직경 80, 60 및 40에 대한 절삭유량과 절삭속도의 변화에 따른 질량농도의 생성 특성을 각각 나타낸 것으로 절삭유량과 원주속도의 증대에 따라서 질량농도가 증대하며, 절삭중 대비 절삭후의 질량 농도가 크게 됨을 각각 나타내고 있으며, 이러한 특성은 기존에 알려진 것과 잘 일치하고 있다.

또한 절삭속도가 약140 m/min 이하의 낮은 저속절삭 구간에서는 절삭유량이 작을수록 질량 농도가 높았으며, 그 이상의 중고속 절삭구간에서는 절삭유량의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타나 있음을 알 수 있다. 어느 경우나 절삭속도 140m/min으로 25초 절삭시에 발생하는 질량 농도가 미국의 NIOSH 에서의 안전허용기준치, 0.5mg/m³이하의 값을 상회하므로 CNC선반 작업을 하는 산업현장에서 이에 대한 대책이 필요하다고 할 수 있다.

Fig. 6의 좌측은 건식 및 습식 절삭시, 우측은 비절삭시에 대한 직경 및 유량별 절삭속도의 변화에 따른 질량농도의 변화를 각각 나타내는 것이다. 절삭시에는 건식인 경우가 질량농도가 가장 낮게 나타났으며 절삭중 보다는 절삭후의 질량 농도가 높게 나타났다. 또한 절삭속도의 증가에 따라서 질량 농도는 증가하는 경향을 나타내고 있는데 이는 이미 알려져 있는 일반적인 내용과 잘 일치하는 것이다. 유량의 변화에 따른 영향은 저속 절삭시는 유량이 많을수록 질량농도가 낮게 나타났으나 중고속 이상의 절삭에서는 유량의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

우측의 비 절삭시의 자료를 보면 절삭시에 비하여 상당히 낮은 수준의 질량 농도가 생성되었음을 알 수 있으며 그 발생특성이 상이하여 비 절삭시의 데이터를 절삭시에 적용할 수 없음을 의미하는 것이라 할 수 있다.

이러한 질량 농도의 특성 변화는 Fig. 3의 수 농도의 변화 특성과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 선반내 및 여러 가지 절삭조건에 대한 절삭전, 후의 SMD변화를 나타낸 것이다. 실험 선반내의 SMD 크기가 0.58~0.91, 건식절삭시는 0.82~0.95, 습식 절삭시는 0.74~1.80μm으로 나타남을 알 수 있다. 이러한 입자의 크기는 사람의 호흡기관을 등을 통하여 체내로 흡입될 수 있는 크기로서 아주 작은 입경이라 할 수 있다.

4. 결론

1. 절삭유의 미립자 발생은 절삭속도의 영향을 크게 받으며, 절삭유량이나 절삭속도의 범위에 따라서 그 발생 특성은 변화한다.

2. 절삭속도 140m/min, 절삭깊이 1.5mm, 이송

속도 0.15mm/rev인 조건으로 25초 동안 절삭시에 발생하는 질량 농도는 NIOSH의 허용기준치 0.5mg/m³을 상회하였다.

3. 발생한 미립자의 SMD의 크기는 1.76 μ m이하로 인체에 매우 유해한 크기였다.

4. 건식 절삭시의 질량 농도가 습식 절삭에 비하여 상당히 낮은 수준으로 나타났으며 환경친화적인 가공방법임을 확인하였다.

후기

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

참고문헌

- G. Byrne, E. Scholta, "Environmentally clean machining process-A strategic approach," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 471-474, 1993.
- F. Klocke, G. Eisenblatter, "Keynote papers : Dry cutting," *Annals of the CIRP*, Vol. 46, No. 2, pp. 519-526, 1997.
- M. Jin, H. Noguchi, M. Murakawa, "Environmentally friendly dry cutting using heat absorption tool," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 29, pp. 235-242, 2001.
- 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.
- D. Hafenbraedl, S. Malkin, "Environmentally-conscious minimum quantity lubrication(MQL) for internal cylindrical grinding," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 28, pp. 149-154, 2000.
- 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.
- 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.
- 황준, 정의식, "환경 친화적 기계가공 기술에 관한 연구:선삭가공시 회전분리기구에 의한 절삭유 미립화와 환경영향," *한국정밀공학회지*, Vol. 19, No. 3, pp. 73-79, 2002.
- 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.
- C. R. Mackerer, "Health effects of oil mists: A brief review," *Toxicology and Industrial Health*, Vol. 5, pp. 429-440, 1989.
- D. D. Bell, J. Chou, L. Nowag, S.Y. Liang, "Modeling of the Environmental Effect of Cutting Fluid," *Tribology Transactions*, Vol. 42, pp.168-173, 1999.

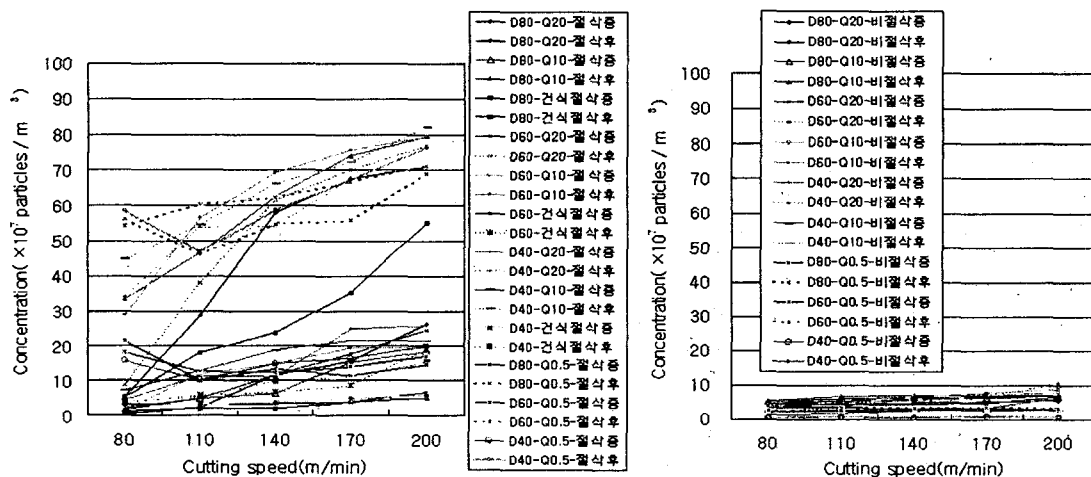


Fig. 3 Dependence of concentration of mist upon various with and without cutting conditions

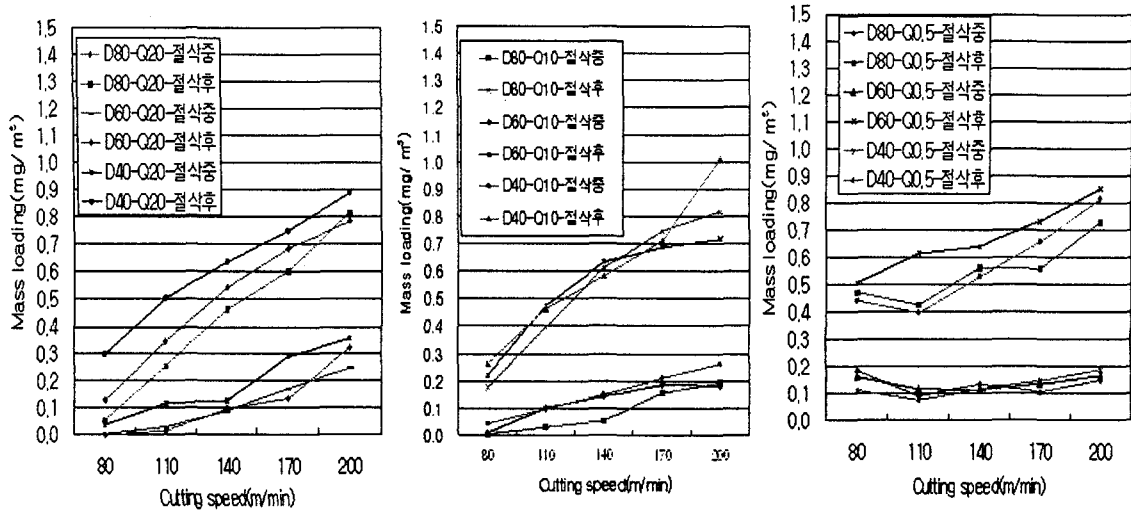


Fig. 4 Dependence of mass loading of mist upon the workpiece diameter at cutting

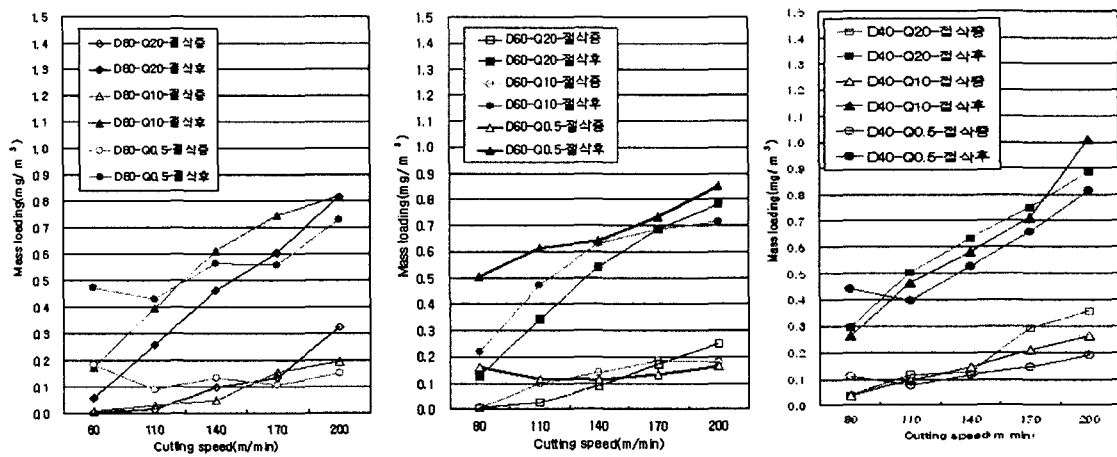


Fig. 5 Dependence of mass loading of mist upon the flow rate of cutting fluid at cutting

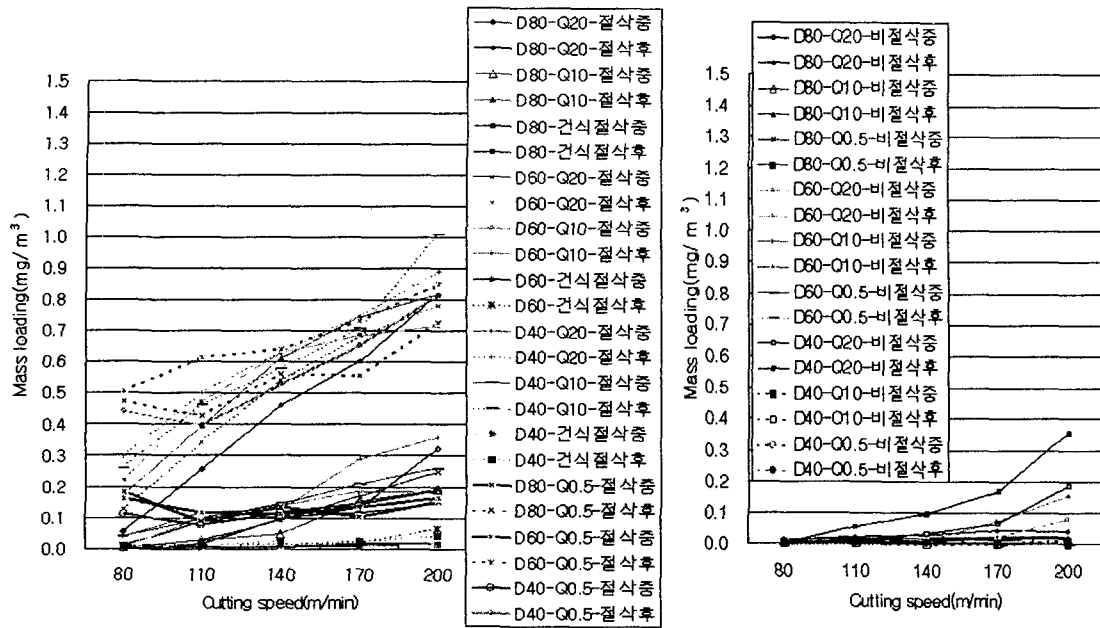


Fig. 6 Mass loading characteristics of generated mist at cutting and non-cutting

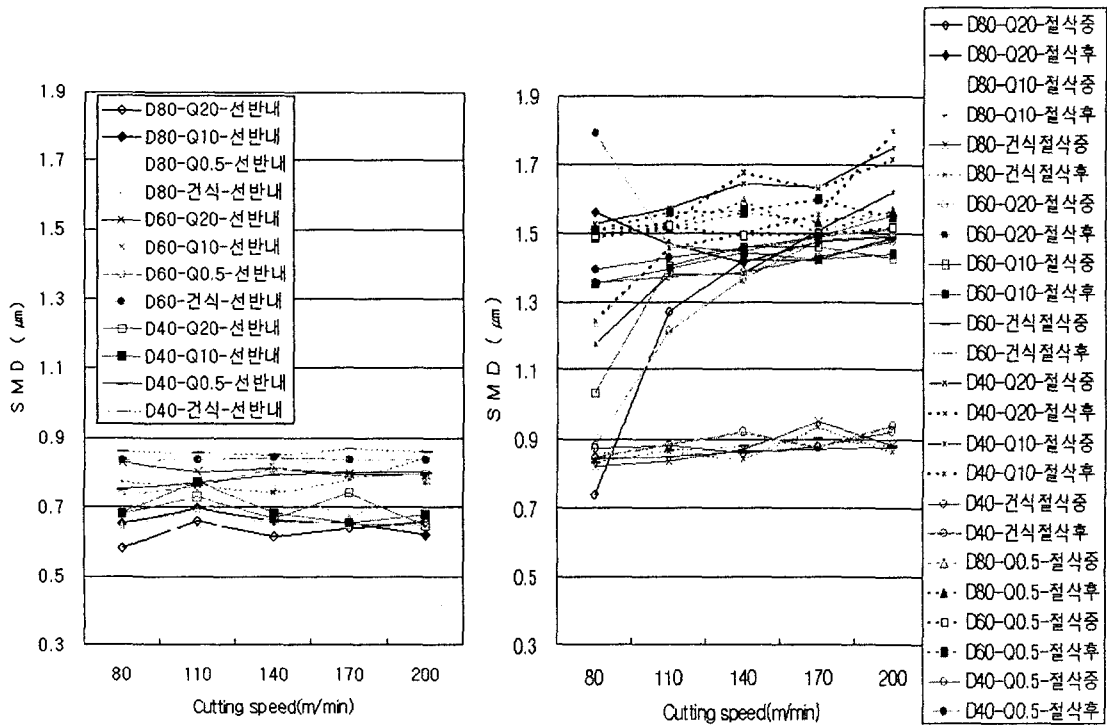


Fig. 7 SMD characteristics of generated mist at cutting and non-cutting