

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

황 준*, 정의식**

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

Joon Hwang*, Eui-Sik Chung**

ABSTRACT

This paper presents the experimental results to verify the environmental consciousness with economic balances due to cutting fluid behaviors, effectiveness in machining process. Even though cutting fluid improves the productivity through the cooling, lubricating effects, its environmental impact is also increased according to the cutting fluid usage. The primary mechanism considered in this study is the spin-off motion of fluids away from rotating workpiece. In this study some parameters are adopted to analyze the productivity(tool wear), environmental impact(mist diffusion rate). The results present the criteria for the reasonable cutting fluid usage quantitatively to develop the environmentally conscious machining process.

Key Words : Environmentally Conscious Machining(환경친화적 기계가공), Cutting Fluid(절삭유), Spin-Off(회전 분리기구), Atomization(미립화), Environmental Impact(환경영향), Productivity(생산성)

1. 서론

기계가공공정에 폭넓게 사용되고 있는 절삭유는 그 탁월한 효과로 인해 가공품질의 향상에 많은 기여를 해왔다. 그러나, 최근 환경과 건강에 대한 관심이 고조되면서, 이러한 절삭유 사용에 따른 부정적인 측면들, 예를 들어 사용 수명이 다된 폐유 처리문제, 절삭유가 작업자에게 미치는 건강과 관련된 문제들을 중심으로 생산기술의 개선이 요구되고 있는 시점이라 할 수 있다. 또한, 대외적으로

는 ISO14000, Green Round, 도쿄협약 등, 일련의 환경관련 국제규제, 신 무역장벽의 형성 등이 향후, 대외경쟁력 확보에 커다란 걸림돌로 작용할 수 있으리라 판단된다. 이러한 시대적인 요구는 생산성 뿐만 아니라, 환경적 측면을 모두 고려할 수 있는 '환경친화적 기계가공 공정'의 개선 또는 개발의 필요성이 시급함을 의미하는 것이다¹⁾.

이미 선진공업국에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 다각도의 연구가 진행되고 있으며, 문제의 해결방법도 사용규제 일변도에서 벗어나, 보다 큰

** 2001년 8월 14일 접수

* 충주대학교 기계설계학과

** 한밭대학교 기계설계공학과

원적인 해법을 찾는 데 노력을 기울이고 있다.

최근, 국내외에서 수행되고 있는 연구 방향들은 일반적으로 절삭유의 사용을 배제한 상태에서의 기계가공, 공구재질을 개선하여 건절삭을 시도하는 연구¹⁾, 또는 냉풍을 이용하여 절삭유의 냉각효과를 대체하는 연구²⁾ 등이 주종을 이루고 있으나, 윤회효과를 보다 보완하기 위한 연구의 필요성도 제기되고 있다. 또한, 그 간의 경험으로 비추어 볼 때, 기계가공을 통해 생산되는 제품의 품질향상 및 가공성 측면에서 절삭유의 사용이 불가피하다는 것이다. 그 이유로서 절삭유가 갖고 있는 윤회작용과 냉각작용을 통해 절삭가공시 발생하는 공구, 공작물, 칩사이에 발생하는 절삭열을 효과적으로 제어할 수 있으며, 이로 인해 제품의 치수정밀도 및 표면품질의 향상과 공구마멸의 감소를 통한 원가절감 및 가격경쟁력이 생기게 된다. 한편, 절삭유의 사용을 통한 작업환경의 악화라는 측면이 최근 강조되면서, 기계가공공정이 3D업종으로 취급되는 경향을 나타내고 있으며, 이는 국가적으로 제조업의 대외경쟁력 약화로 이어져 심히 우려되는 바이다.

일반적으로, 절삭유의 환경영향을 평가하기 위한 양적인 지표로서 작업현장에 존재하는 공기중의 미립자 크기와 농도를 사용한다. 미립자 크기는 흡입과 밀접히 관련된 중요한 인자로서, 유입식 윤회에서는 평균직경 약 5 μm 정도의 커다란 미립자가, 그리고 분무식 오일-미스트 윤회에서는 약 1 μm 정도의 미립자가 발생되어 작업장의 대기오염을 악화시킨다. 미국 OSHA (Occupational Safety and Health Administration)에서는 현재, 공기중 금속작업유의 허용노출 농도를 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 로 제한하고 있다. 이는 1970년에 제정된 것으로서 미국 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)에서 조사 중이다³⁾. 이상의 문제점들을 해결하기 위해서는 절삭유의 사용량을 적절히 제한 또는 제어할 수 있는 기본 자료가 필요하며, 이러한 자료의 확보를 통한 최적의 절삭유 사용 방안이 필요하다고 볼 수 있다.

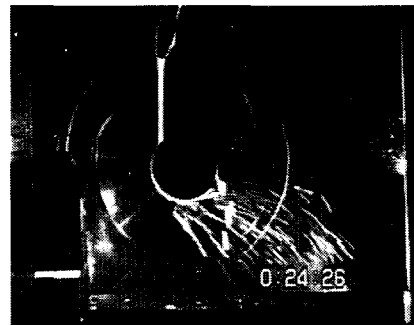
따라서, 본 연구에서는 주로 경험에 의해서만 사용되어 왔던 절삭유 효과와 환경영향을 보다 정량적으로 분석하고자 한다. 첫째, 기계가공 및 공작기계의 특성상 공구 또는 공작물의 회전원심력에 기인한 회전분리기구(spun-off mechanism)에 의해 발생하는 절삭유 미립자(미스트)의 거동특성을 파

악하고, 둘째, 제품생산성 및 생산원가에 커다란 비중을 차지하고 있으며, 가공품질 및 제조원가에 영향이 큰 공구마멸량과 표면거칠기를 생산성 및 경제성지표(Productivity & Economy Index)로 설정하여 절삭유의 사용과 공구마멸특성을 정량적으로 분석하고, 환경친화성지표(Environmental Consciousness Index)로서 절삭유 미립자 분산량을 측정하여 절삭유 사용에 따른 환경영향을 고찰하고자 한다.

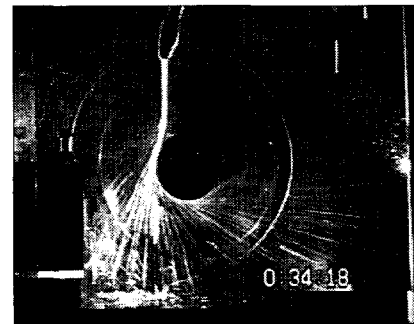
본 연구에서는 이들의 결과를 종합하여 기계가공성과 환경친화성을 동시에 고려할 수 있는 최적의 절삭유 사용량을 제시하고자 한다.

2. 절삭유 미립화 기구

절삭유가 작업자의 건강과 작업환경에 영향을 주는 이유는 절삭유 사용량 그 자체 보다는 공작기계의 운동원리 또는 기계가공원리에 의해 발생하는 절삭유의 2차적인 유동에 있다고 판단된다.



(a) 270 rpm



(b) 1850 rpm

Fig. 1 Photo of cutting fluids atomization via spin-off mechanism in turning operation

절삭유 노즐로 공급된 절삭유는 공작물의 회전 원심력에 의해 미립자 형태의 물방울로 분산되어 공작기계 주변 및 작업자에게 비산하는 과정을 Fig.1에 나타낸 바와 같이 고속카메라를 이용하여 확인할 수 있으며, 절삭유 미립자의 형성은 주축의 회전속도, 공급된 절삭유량에 가장 큰 영향을 받고 있다.

선삭가공시 절삭유가 공구와 공작물상에서 비산되는 상태를 Fig.2에 나타내었다. 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.

절삭유 미립자의 분무과정은 유체분사나 얇은 유막이 유체운동에너지나 혹은 고속공기의 상호작용, 운동장치를 통한 외부에너지에 의해 물방울형태로 떨어져 분산된다. 유체 회전원판의 형태는 유속에 따라 유막형성모드(film formation mode), 물줄기 형성모드(ligament formation mode), 물방울형성모드(drop formation mode)의 3가지 분무형태를 갖는다.

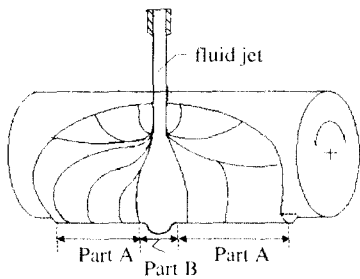


Fig. 2 Typical cutting fluid behavior in machining process

Figure 3 은 "A"점에서 절삭유가 원통주변에 어떻게 유막을 형성하는지를 보여주고 있다. 유속이 높은 "1"의 부분에서, 대기의 외관은 유막을 물방울로 분해하며, 이는 얇은 유막형태로 분무되는 과정이 된다. 유체유량이 점차로 감소하는 "B"점에서, 원주방향을 따라 물줄기(ligament)가 형성되어 소위 물줄기형성모드의 분무작용이 일어난다. 마찬가지로, 낮은 유속의 "C"점에서 절삭유가 물방울 형태로 원심분리되어, "3"의 부분에서 보여주는 바와같이, 물방울 형성 분무작용이 일어난다. 마지막으로,

나머지 절삭유는 "D"점을 통과하고, 그밖의 것은 표면장력이 원심력보다 커서 공작물에 들러붙어 도포 유체층(coating liquid layer)을 형성한다.

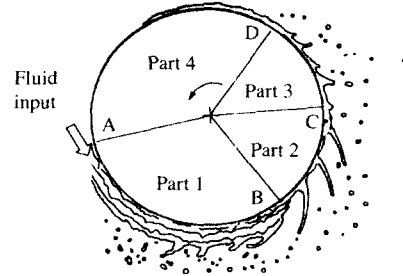


Fig. 3 Rotary disk atomization process and three formation modes

3. 절삭유 미립자의 측정 및 평가

절삭유 미립자에 의한 환경영향을 보다 구체적으로 규명하기 위해서는 미립화되는 절삭유의 거동을 실시간으로 측정할 수 있는 실험이 필요하며, 본 연구에서는 수행한 비절삭상태실험은 이러한 절삭유의 거동을 살펴기 위한 회전장애실험을 실시하였다. 회전장애실험이란 선관의 회전속에 공작물의 장착하고 절삭유를 공급하면서, 이때 회전분리(spinn-off) 기구에 의해 발생하는 절삭유의 미립자의 거동을 실시간으로 측정하는 것이다. 절삭유 미립자의 거동을 측정하기 위해서는 위상 도플러 효과를 이용한 입자동력학분석기(PDA, Particle Dynamics Analyzer, Dantec/Invent) 장치를 사용한다.

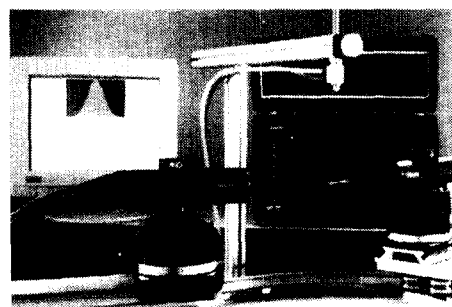


Fig. 4 Photo of PDA system for aerosol particle measurement of cutting fluid

또한, 이 장치는 Arg-Ion 레이저 소스로부터 생성된 빛을 이용하여 최대 470m/s의 속도로 움직이는 최소 0.5 μm~13 mm 직경의 미립자와 분포수를 자동으로 측정하여 출력할 수 있으며, 측정된 자료는 전용신호처리장치(58N80 MultiPDA signal processor)를 이용하여 디지털오실로스코프(LeCroy 9310A), P/C에 저장하여 분석하였다.

절삭실험에서는 CNC선반(TSL-6, Hwacheon), 사용한 공작물은 φ50, SM20C, 초경합금공구(CNMA K10종, Taegutec)이다. 공구 여유면 마멸량은 공구현미경(TM-101, Mitutoyo)로 30 배율 확대로 측정하였다. 사용된 절삭유는 수용성 ROCOL 370을, 회전분리에 의해 주축주변에 비산된 절삭유 미립자 확산량은 척(chuck)을 기준으로 상, 중, 하 위치 250 mm 거리에서 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭유 미립자의 거동특성

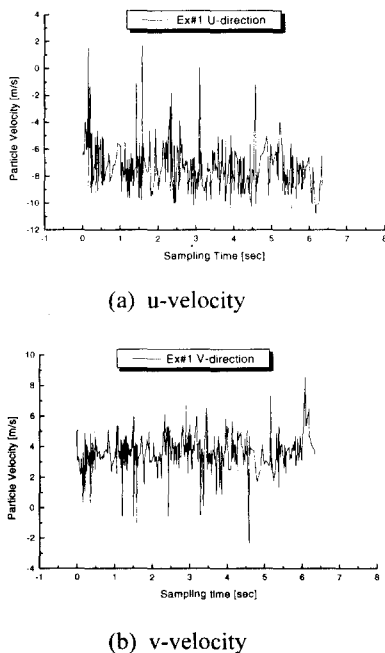


Fig. 5 Cutting fluid's aerosol particle velocity with respect to arrival time(EX#1)

공작물의 고속회전에 의한 원심력으로 인해 절삭유는 회전분리되어 미립화된 후 공기중에 작은 물방울 형태로 확산된다. PDA를 이용하여 절삭유 미립자의 확산속도를 u, v 방향으로 나누어 공작물로부터 16mm 떨어진 지점(EX#1)에서 측정된 결과를 Fig.5에 나타내었다.

절삭유 미립자는 초기 미립자 발생, 비행, 자유낙하의 형태로 공기중에 확산되며, Fig.5에 나타낸 바와 같이, 주축회전 2000rpm 조건에서 측정된 미립자의 평균속도는 u-방향이 약 6~8m/s, v-방향이 약 3~5m/s의 속도로 공기중에 확산되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, u-방향의 속도성분이 음(-)의 수로 표시된 것은 측정좌표 설정에 따른 차이이며, 속도절대값은 같다.

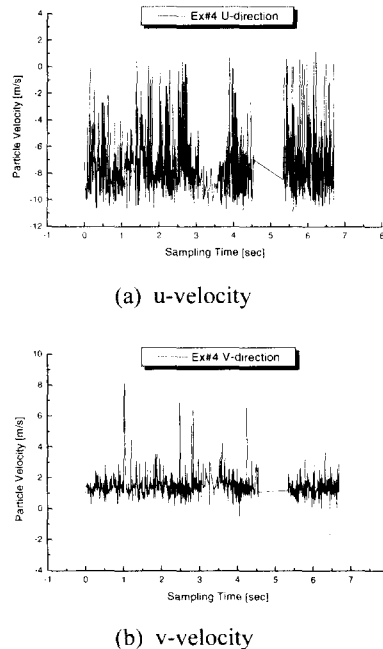
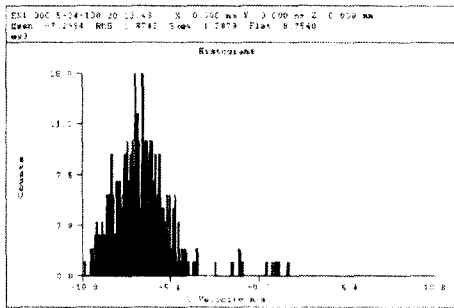


Fig. 6 Cutting fluid's aerosol particle velocity with respect to arrival time(EX#4)

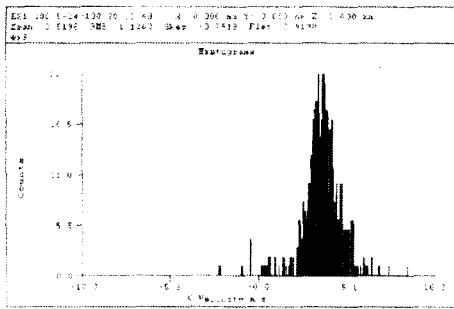
공작물로부터 22mm 떨어진 지점(EX#4)에서 절삭유 미립자를 측정된 경우의 평균속도를 Fig.6에 각각 u, v 방향으로 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와같이, u-방향의 평균속도성분은 7~10 m/s, v-방향의 속도성분은 1~2 m/s로 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 공기중에 확산된 절삭

유 미립자는 비산시간이 경과할수록 초기의 운동량 에너지를 상실하고, 대기중 미립자 확산방향과 속도성분이 각 미립자 별로 크게 편차를 나타내면서 결국, 중력에 의한 자유낙하로 작업자 바닥에 떨어지게 된다.

실험#1(EX#1) 과 실험#4(EX#4) 조건에서 측정된 절삭유 미립자의 평균속도 분포도를 측정된 입자수(counts)를 기준으로 나타낸 결과가 Fig.7 과 Fig.8 과 같다. 실험 #1 에서는 u-방향 평균속도 7.29 m/s, v-방향 평균속도 3.52 m/s, 실험 #4의 u-방향 평균속도 7.39 m/s, v-방향 평균속도 1.42 m/s 를 나타내고 있으며, 공작물로 부터의 거리가 멀어짐에 따라 u-방향으로의 속도성분의 변화가 커지는 반면, v-방향으로는 확산속도가 감소하는 분포도를 나타내고 있다.

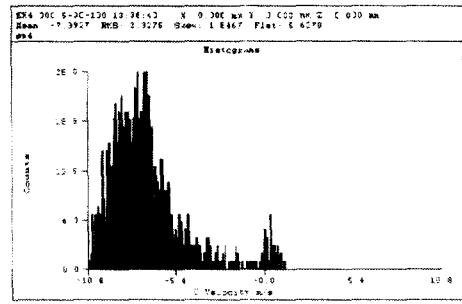


(a) u-velocity

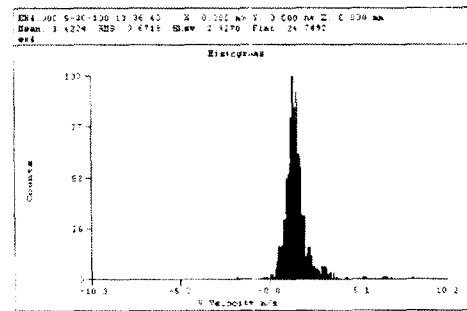


(b) v-velocity

Fig. 7 Distribution of cutting fluid aerosol velocity due to spin-off mechanism (EX#1)



(a) u-velocity



(b) v-velocity

Fig. 8 Distribution of cutting fluid aerosol velocity due to spin-off mechanism (EX#4)

4.2 절삭유에 의한 공구마멸 및 표면거칠기 특성

실험에 사용된 주축회전수는 300~2500 rpm 의 조건이고, 건절삭, 절삭유량 0.5ℓ/min ~ 4ℓ/min로 절삭유량을 변경시켜 절삭실험을 실시하였다.

Figure 9에는 절삭시간에 따른 공구마멸량의 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭시간이 증가함에 따라 어유면 마모량은 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 특히, 건절삭에 비해 절삭유 공급량이 증가할수록 공구마멸량의 증가폭은 크게 둔화되고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 절삭유의 윤활, 냉각효과에 기인함을 파악할 수 있다. 절삭유량에 따른 공구마멸량의 관계를 Fig.10에 나타내었으며, 건절삭과 비교하여 0.5ℓ 이상의 임계유량에서는 마멸량 감소폭이 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다. 주축회전수가 증가할수록 공

구마벌 측면에서 절삭유 공급효과는 감소하고 있는 것을 알 수 있는데, 이는 칩(chip)의 배출속도가 증가하면서, 제대로 절삭유가 절삭점에 도달하지 못하는 이유에 의한 것으로 판단된다.

절삭조건에 따른 가공제품의 표면거칠기 변화 정도를 Fig.11 에 나타내었다. 표면거칠기는 기계 가공에 있어 생산성을 대표할 수 있는 매우 중요한 인자이며, 절삭유 사용의 주요 이유중의 하나가 되고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭유량, 절삭속도, 이송속도 등을 변경하면서 실험한 결과이다. 이상적인 절삭에서는 표면거칠기는 이송량의 제공에 비례하는 것이 일반적인 결과이며, 본 실험결과에서도 이송량에 비례하여 표면거칠기 값이 증가하는 결과를 나타내고 있다. 그러나, 300rpm 조건과 비교하여 1300rpm으로 절삭속도가 증가한 조건에서는 절삭유의 공급효과가 크게 떨어지고 있음을 정량적으로 확인할 수 있으며, 이는 칩배출 속도의 증가로 절삭유가 절삭날과 공작물의 접촉부분의 유효작용을 충분하게 하지 못하기 때문으로 판단된다.

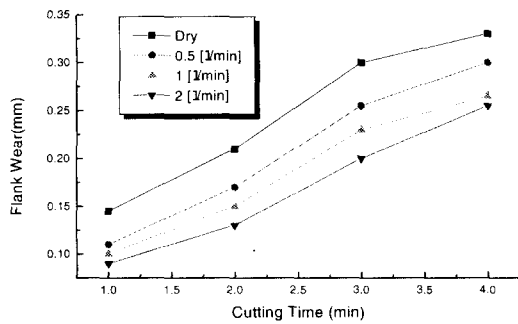


Fig. 9 Tool wear increments with respect to cutting time (1500 rpm)

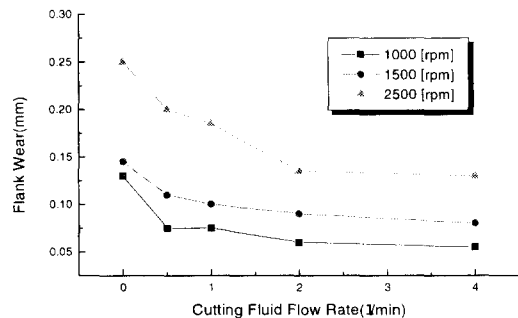
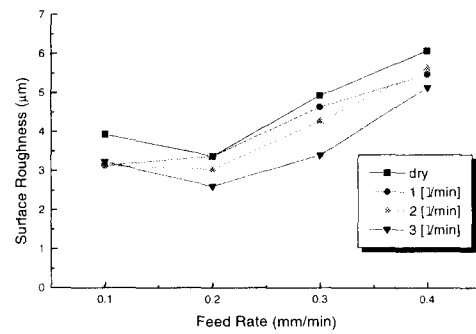
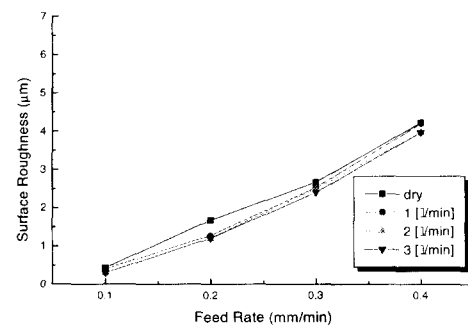


Fig. 10 Variation of tool wear with respect to

cutting fluid flow rate & cutting speed



(a) 300 rpm



(b) 1300 rpm

Fig. 11 Variation of surface roughness with respect to cutting fluid flow rate and cutting conditions

4.3 절삭유량에 따른 절삭유 미립자 확산특성

절삭유량과 운전시간에 따른 절삭유 미립자의 대기중 확산량 분포를 Fig.12에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 미립자 확산량은 공급된 절삭유량과 운전시간에 비례하여 급증하는 경향을 나타낸다. 또한, 절삭유량과 공작물 회전속도 변화에 따라 대기중에 확산된 절삭유 미립자 확산량의 관계를 측정하여 Fig.13에 나타내었다. 절삭유 미립자의 대기중 확산량은 절삭속도(공작물회전수)와 절삭유량의 조합에 의해 임계속도 및 유량이 존재함을 확인할 수 있으며, 본 실험결과에서는 절삭유량 2l/min 이하의 사용이 절삭유 미립화에 의한 미립자 확산량은 매우 급증하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 절삭유량 1l/min 이하의 절

삭유량이 공급되는 경우와 비교해 볼 때 약 20배 이상 대기중 확산량이 급증하는 결과이며, 이로 인해 수반될 수 있는 환경영향 및 대기오염을 최소화할 수 있는 임계치라 사료된다.

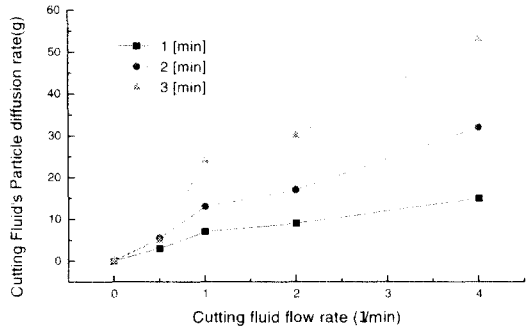


Fig. 12 Variation of diffusion rate of cutting fluid in the air with respect to cutting fluid flow rate and operation time (2500 rpm, middle position)

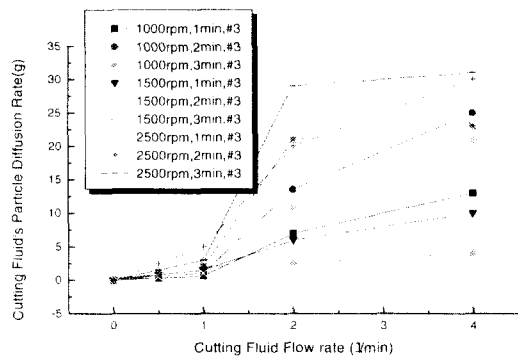


Fig. 13 Comparison of cutting fluid diffusion rate in the air with respect to cutting fluid flow rate and cutting conditions(top position)

4.4 임계사용 절삭유량

생산성과 밀접한 관련이 있는 공구마멸량과 절삭유의 환경영향과 밀접한 대기중 절삭유 미립자의 확산량을 다양한 실험조건하에서 측정한 결과, 절삭유량의 증가에 따라 두 가지 지표는 서로 상반된 결과를 보이고 있으며, 결국, 생산성과 환경적 측면을 균형있게 고려할 수 있는 절삭유량의 사용 방안이 제시되어야 할 것이다.

본 연구에서는 절삭유 사용을 통한 공구마멸 및

표면거칠기 향상 효과는 고속절삭 영역에서는 크지 않음을 정량적으로 확인할 수 있었으며, 반면에 회전분리기에 의한 절삭유 미립화 현상은 유량과 회전속도에 비례하여 급증하는 결과를 나타내고 있다. 따라서, 생산성 지표를 크게 악화시키지 않는 범위내에서 우선적으로 절삭유 사용량을 조절할 필요가 있으며, 본 실험결과로 볼 때, 1500 rpm 이하의 선삭가공에서는 절삭유량은 최소 2l/min 이하를 임계유량으로 하여 사용할 것을 제안한다.

5. 결론

본 연구에서는 환경친화적 기계가공을 위해 생산성 및 경제성지표와 환경친화성지표로 사용될 물리량을 각각 설정하고, 절삭유 사용량과 절삭조건에 따른 공구마멸량과 대기중의 절삭유 미립자 확산량의 관계를 고찰하였다. 이들 두가지 지표들은 서로 상반되는 특성인자로서 이 두가지 특성을 동시에 만족할 수 있는 임계 절삭유량의 설정을 통해 생산성과 환경친화성이 균형있게 조화된 환경친화적 기계가공을 구현하는데 기본 자료로 활용될 수 있으리라 판단된다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 NO. 2001-1-30400-026-2 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Pfeifer, T., Eversheim, W., König, W., "Manufacturing Excellence," pp. 517-521, 1994.
2. Zhao, Z., Hong, S. Y., "Cooling Strategies for Cryogenic Machining from a Materials Viewpoint," J. of Materials Engineering and Performance, Vol. 1, No. 5, pp. 615-619, 1992.
3. U.S. Department of Health and Human Services, "Occupational Exposure to Metalworking Fluids," NIOSH Pub., No. 98-102, 1998.
4. Bayvel, L., Orzechowski, Z., "Liquid Atomization, Combustion," Taylor & Francis, 1993.
5. Hwang, J., Chung, E. S., "Optimization of Cutting Fluids for Environmentally conscious Machining," KSPE Annual Conference, Vol.2, pp. 948-951, 2000.