

# 기계가공시 공구수명과 절삭유 미립화에 따른 환경적 측면에 관한 연구

황 준\*(충주대학교 기계설계학과), 정의식\*\*(대전산업대학교 기계설계공학과),  
홍기배\*\*\* (충주대학교 열공학과), 성노철\*\*\*\* (충주대학교 대학원)

## The Effect of Tool Wear and Environmental Consciousness due to Cutting Fluid Atomization in Machining Process

Joon Hwang\*(ChungJu National Univ.), Eui-Sik Chung\*\*(Taejon National Univ. of Technology),  
Gi-Bae Hong\*\*\* (ChungJu National Univ.), Noh-Chul Sung\*\*\*\* (Graduate School of ChungJu National Univ.)

### ABSTRACT

This paper presents the experimental results of relationship between the machinability and environmental consciousness due to cutting fluid atomization in machining process. Even though cutting fluid improves the machined part quality through the cooling and lubricating effects, its environmental impact is also increased according to the cutting fluid usage. Cutting tool wear is one of criterion for deciding the machinability. A few turning operations were performed to know the qualitative effectiveness of cutting fluid to tool wear improvement.

This research can be used as a basis for environmental impact analysis on the shop floor. It can be also facilitate the optimization of cutting fluid usage in achieving a balanced consideration of productivity and environmental consciousness.

**Key Words** : Cutting Fluid(절삭유), Environmental Consciousness(환경친화성), Tool Wear(공구마모), Atomization (미립화), Environmental Impact(환경적 침해), Machining Process(기계가공)

### 1. 서론

기계가공에 있어서 절삭유의 탁월한 효과에 힘입어 가공품질의 향상을 가져온 것은 사실이며, 대부분의 기계가공 공정에서 사용되고 있는 실정이다. 그러나, 최근 환경과 건강에 대한 관심이 고조되면서, 이러한 절삭유 사용에 따른 부정적인 측면들, 예를 들어, 사용수명이 다된 폐유처리 문제, 절삭유가 작업자에게 미치는 문제등을 중심으로 생산기술의 개선이 요구되고 있는 시점이라 할 수 있다. 이러한 문제는 단순히 절삭유를 사용하지 않는 것만으로는 해결이 불가능하며, 기계가공성 측면과 환경적 측면 모두를 고려할 수 있는 환경친화적 기계가공 프로세스의 개선 또는 개발을 의미한다.

이미 선진공업국에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 다각도의 연구가 진행되고 있으며, 문제의 해

결방법도 사용규제 일변도에서 벗어나 보다 근원적인 해법을 찾는 데 노력을 기울이고 있다<sup>1)</sup>.

‘환경친화적 생산·제조프로세스’라고 부를 수 있는 이러한 공정개선 및 개발은 궁극적으로 경제적인 측면에서도 반드시 고려되어야 할 부분이며, 특히, 현재 제조프로세스의 기본 목표인 고품질의 제품개발과 제조생산성 향상에 저해를 가져와서는 안 되는 이율배반적인 성격을 갖는 사안이기도 하다.

그런데, 최근 국내외에서 수행되고 있는 연구방향들은 일반적으로 절삭유의 사용을 배제한 상태에서의 기계가공, 즉 냉풍을 이용하여 절삭유의 냉각효과를 대체하는 연구, 공구재질을 개선하여 건절삭을 시도하는 연구 등이 주종을 이루고 있으나, 유효효과를 보다 보완하기 위한 연구의 필요성도 제기되고 있다.

또한, 그 간의 경험으로 비추어 볼 때, 기계가공

을 통해 생산되는 제품의 품질향상 및 가공성(machinability) 측면에서 절삭유의 사용이 불가피하다는 것이다. 그 이유로서 절삭유는 그 특유의 윤활작용과 냉각작용을 통하여 절삭가공시 발생하는 공구, 공작물, 칩사이에 발생하는 절삭열을 효과적으로 제어할 수 있으며, 이로부터 제품의 치수정밀도 및 표면품위의 향상과 공구마멸의 감소를 통한 원가 절감이 가능하게 하는 역할을 하고 있기 때문이다.

한편, 절삭유의 사용을 통한 작업환경의 악화라는 측면이 최근 강조되면서, 기계가공프로세스가 3D 업종으로 취급되는 경향을 나타내고 있으며, 이는 국가적으로 제조업의 대외경쟁력 약화로 이어지고 있다.

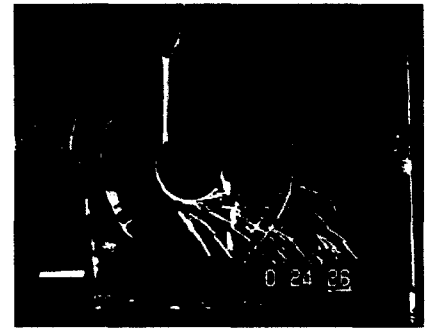
일반적으로, 절삭유의 환경영향을 평가하기 위한 양적인 지표로서 작업현장에 존재하는 공기중의 미립자 크기와 농도를 사용한다. 미립자 크기는 흡입과 밀접히 관련된 중요한 인자로서, 유입식(flood-type)냉각법에서는 평균직경 약  $5\mu\text{m}$  정도의 커다란 미립자가, 그리고 분무식 오일-미스트(oil mist) 윤활에서는 약  $1\mu\text{m}$  정도의 미립자가 발생되어 작업장의 대기오염을 악화시킨다. 미국 OSHA(Occupational Safety and Health Administration)에서는 현재, 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 제조사 중이다<sup>2)</sup>.

이상의 문제점들을 해결하기 위해서는 절삭유의 사용량을 적절히 제한 또는 제어할 수 있는 기본 자료가 필요하며, 이러한 자료의 확보를 통한 절삭유 공급의 최적화 방안이 필요하다고 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 제품생산성 및 생산원가에 커다란 비중을 차지하고 있으며, 가공품질에 영향이 큰 공구마멸량을 기계가공성지표(machinability index)로 설정하여 절삭유의 사용에 따른 공구마모특성을 정량적으로 분석하고, 환경친화성지표(environmental index)로서 공작기계의 주축의 회전관성, 즉 원심력에 기인한 절삭유의 회전분리(spin-off)에 의한 절삭유 미립자 분산량을 측정하여 절삭유 사용에 따른 환경침해성을 고찰하고자 한다. 또한, 본 연구에서는 이들의 결과를 종합하여 기계가공성과 환경친화성을 동시에 고려할 수 있는 최적의 절삭유 사용량을 제시하고자 한다.

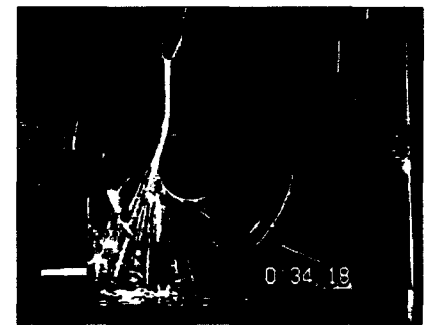
## 2. 절삭유 미립화 기구

절삭유가 작업자의 건강과 작업환경에 영향을 주는 이유는 절삭유 사용량 그 자체 보다는 공작기계의 운동원리 또는 기계가공원리에 의해 발생하는 절삭유의 2차적인 유동에 있다고 판단된다. Figure 1

에 나타난 바와 같이 주축의 회전에 의해 노즐로부터 공급된 절삭유는 원심력에 의해 미립자 형태의 물방울로 분산되어 공작기계 주변 및 작업자에게 비산하게 되며, 주축의 회전속도, 공급된 절삭유량에 가장 큰 영향을 받고 있다.



(a) 270 rpm



(b) 1850 rpm

Fig. 1 Photo of cutting fluids atomization in turning process

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 막판의 유막을 형성하게 된다. 즉 절삭유 미립자의 형성과정은 유체유동장해석과 유체분무이론에 의한 회전원판과 얇은 유막형태로 취급할 수 있다.

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

는다.

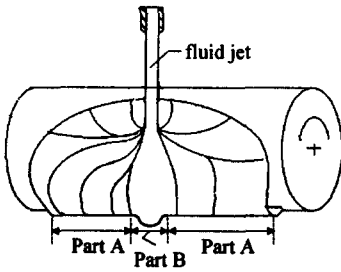


Fig. 2 Typical cutting fluid behavior in machining process

Fig.3 은 "A"점에서 절삭유가 원통주변에 어떻게 유막을 형성하는지를 보여주고 있다. 유속이 높은 "1"의 부분에서, 대기의 외란은 유막을 물방울로 분해하며, 이는 얇은 유막형태로 분무되는 과정이 된다. 유체유량이 점차로 감소하는 "B"점에서, 원주 방향을 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.

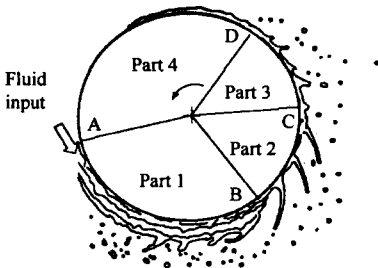


Fig. 3 Rotary disk atomization process and three formation modes

유막형성모드(film formation mode)에서, 물방울 직경  $D_{film}$  은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{film} = C_1 \frac{(Q_{disk} - Q_{2-3})^{0.5}}{\omega R^{0.8}} \frac{\sigma^{0.4}}{\rho^{0.4}} \quad (1)$$

물줄기형성모드(ligament formation mode)에서는 불안정한 유동 물줄기들이 작은 물방울 형태로 분해되어 원주주위에 나타나며, 물방울 직경은 대략:

$$D_{ligament} = C_2 \sqrt{\frac{Q_{2-3} - Q_{1-2}}{\pi N V_L}} \quad (2)$$

물방울형성모드(drop formation mode)에서는 표면장력보다 큰 원심력에 의해 유체가 물방울 형태로 분해되는 것으로 물방울 직경은:

$$D_{drop} = \sqrt{6} \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^{1/2} \left( \frac{R}{(V_\theta + \omega R)^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Fig.3 은 원심력에 기인하는 공작물 표면에서의 유막의 분산과 교란과의 성장을 나타내는, "B"부분에서의 얇은 유막분무작용의 과정을 보여준다. Rayleigh의 표면파 이론(surface wave theory)에 따르면, 물방울 체적은 박판파(sheet wave) 와 같다.

$$D_{sheet} = 3 \sqrt{a \frac{W_c \sigma}{\rho_{air}}} \quad (4)$$

이상의 각 형성기구에서 나타낸 식(1)~(4)를 이용하여 기계가공중에 미립화된 절삭유의 미립자의 직경을 예측할 수 있다.

### 3. 실험방법 및 장치

본 실험에서는 CNC 선반(TNV-40A)를 이용하여 절삭실험을 수행하였으며, 사용된 공작물은 SM20C,  $\phi$  50, 공구는 초경합금(CNMA K10종, 대한중석), 공구 홀더는 PCNLR2020K12를 사용하였다. 공구의 여유면 마멸량은 공구현미경(B-1, Mitutoyo Mfg. Co.)로 30 배율 확대로 측정하였다. 사용된 절삭유는 수용성 Rocol 370을, 회전분리기에 의해 주축주변에 비산된 절삭유 미립자확산량은 척(chuck)을 기준으로 상, 중, 하 위치 250 mm 거리에서 측정하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 절삭유량에 따른 공구마모특성

실험에 사용된 주축회전수는 1000~2500 rpm 의 조건이고, 건절삭, 절삭유량 0.5l, 1l, 2l, 4l 로 절삭유량을 변경시켜 절삭실험을 실시하였다.

Figure 4에는 절삭시간에 따른 공구마멸량의 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭시간이 증가함에 따라 여유면 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.5 에 나타내었으며, 건절삭과 비교하여 0.5l 이상의 임계 유량에서는 마멸량 감소폭이 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다.

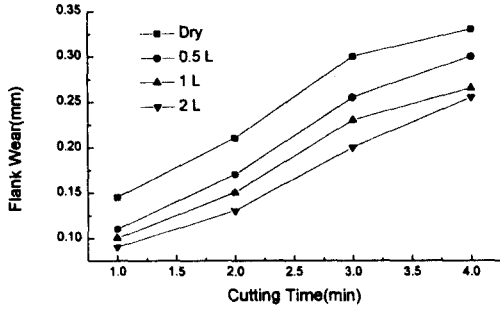


Fig. 4 Tool wear increments with respect to cutting time (1500 rpm)

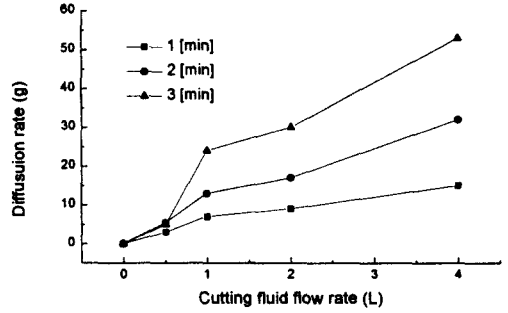


Fig. 6 Variation of diffusion rate of cutting fluid in the air with respect to cutting fluid flow rate and operation time

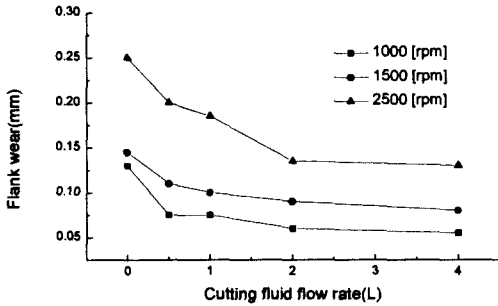


Fig. 5 Variation of tool wear with respect to cutting fluid flow rate & cutting speed

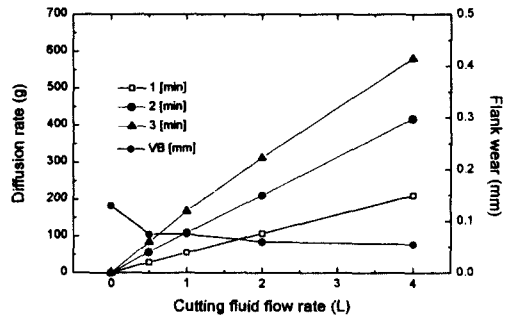


Fig. 7 Comparison of cutting fluid diffusion rate in the air and flank wear with respect to cutting fluid flow rate

#### 4.2 절삭유량에 따른 절삭유미립자 확산특성

절삭유량과 운전시간에 따른 절삭유 미립자의 대기중 확산량 분포를 Fig.6 에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 미립자 확산량은 공급된 절삭유량과 운전시간에 비례하여 급증하는 경향을 나타낸다. 또한, 절삭유량에 따른 공구의 여유면 마멸량과 대기중에 확산된 절삭유 미립자량의 관계를 측정하여 Fig.7에 나타내었다. 절삭가공시 공급된 절삭유는 공급량이 증가할수록 공구의 마모에는 유리한 결과를 가져오나, 공급량과 공급시간이 증가할수록 대기중의 절삭유 미립자의 확산량은 매우 급증하는 경향을 나타내고 있다. 또한, 특기할 사항은 주축회전수가 증가할수록 공구마멸 측면에서 절삭유 공급효과는 감소하고 있는 것을 알 수 있는데, 이는 칩(chip)의 배출속도가 증가하면서, 제대로 절삭유가 절삭점에 도달하지 못하는 이유에 의한 것으로 판단된다.

이상의 결과들은 기계가공성과 환경친화성을 동시에 만족시킬 수 있는 최적의 절삭유량이 존재할 수 있음을 암시하는 것으로서, 본 연구에서는 0.5ℓ ~ 1ℓ 의 절삭유량을 임계유량으로 볼 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 환경친화적 기계가공을 위해 기계가공성지표와 환경친화성지표를 설정하고, 절삭유 사용량과 절삭조건에 따른 공구마멸량과 대기중의 절삭유미립자 확산량의 관계를 고찰하였다. 이들 두 가지 지표들은 서로 상반되는 특성인자로서 이 두 가지 특성을 동시에 만족할 수 있는 임계 절삭유량을 설정을 통해 생산성과 환경친화성이 균형있게 조화된 환경친화적 기계가공을 구현할 수 있다.

#### 참고문헌

1. Pfeifer, T., Eversheim, W., König, W., "Manufacturing Excellence", pp. 517-521, 1994.
2. U.S. Department of Health and Human Services, "Occupational Exposure to Metalworking Fluids," NIOSH Pub., No.98-102, 1998.
3. Bayvel, L., Orzechowski, Z., "Liquid Atomization, Combustion", Taylor & Francis, 1993.