

## 절삭유의 미립화 특성

황 준\*(충주대학교 기계설계학과), 정의식\*\*(한밭대학교 기계설계공학과),  
정진열\*\*\* (충주대학교 대학원), 황덕철\*\*\*\*(인천대학교 대학원)

### Atomization Characteristics of Cutting Fluids

Joon Hwang\*(ChungJu National University), Eui-Sik Chung\*\*(Hanbat National University),  
Jin-Yel Joung\*\*\* (Graduate School of ChungJu National University),  
Duck-Chul Hwang\*\*\*\*(Graduate School of Incheon University)

#### ABSTRACT

This paper presents atomization characteristics of cutting fluids. To analyze the behavior characteristics of cutting fluid, analytical approach and experimental measurement were performed to predict the aerosol size, velocity and concentration due to cutting fluid atomization mechanism in machining operation. The established analytical model which is based on atomization theory analyzes the cutting fluid motion and aerosol generation in machining process. The predictive models 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 :** Environmentally Conscious Machining(환경친화적 기계가공), Cutting Fluid(절삭유), Atomization Mechanism(미립화 기구), Productivity(생산성), Environmental Impact(환경적 침해), Optimization(최적화)

#### 1. 서론

기술수준의 급속한 발달과 함께 고품질의 제품 제조가 국가의 경쟁력을 좌우하는 매우 중요한 국가 전략이 되고 있으며, 전 세계 공업선진국들은 수준 높은 생산가공기술 개발과 연구에 박차를 가하고 있다. 한편, 환경, 위생 및 안전에 대한 관심과 규제가 심화되면서 야기되고 있는 환경문제에 대한 시급한 대응책 마련을 위해, 생산제조 단계에서 부터 가공 폐기물 및 인체 유해 물질의 발생을 억제하거나 극소화 하기 위한 예방기술의 개발이 시급히 요청되고 있다.

기계가공공정에 다량으로 사용되고 있는 절삭유는 그 탁월한 효과로 인해 제조생산성과 품질을 높이는 데 폭넓게 적용되고 있으나, 과다 사용에 의한 환경오염은 물론, 근로자의 위생 및 안전문제를 발생시키고 있다. 이러한 절삭유의 사용이 오랜동안 주로 경험에만 의존하여 사용되어 왔던 바, 경제성 및 생산성과 환경성 측면에서 정량적으로 균형있는

사용이 불가능하였다. 또한, 종래의 환경관련기술들은 환경적인 측면만을 강조한 나머지, 사용규제 일변도의 접근과 사용후 발생된 폐기물에 대한 사후처리에 주로 관심이 모아져왔다<sup>1)</sup>.

본 연구에서는 첫째, 환경친화적 기계가공의 구현을 위해 기계가공공정 전반에 대한 조명을 실시하고, 집중적으로 관리, 개선해야 할 공정에 대해 검토하였다. 둘째, 생산성이 충분히 고려될 수 있는 환경친화적 기계가공 공정 개선을 위해 최적의 절삭유 미립자 형성·제어를 구현하여야 하며, 절삭유 미립자 발생원의 기본 메카니즘을 확립하고, 다양한 절삭조건하에서 절삭유의 미립화 특성을 알아보기 위한 정밀측정실험을 실시하고 그 결과를 분석함으로써, 보다 근원적인 미립화에 의한 환경, 위생, 안전 부분의 폐해를 줄여나갈 수 있을 것으로 기대한다.

#### 2. 청정생산 흐름도

Fig.1 에 나타낸 바와 같이 기계가공공정에 사용

되는 모든 물질에 대한 물질수지(material balance)에 대한 개념의 도입도 환경친화적 기계가공을 구현하는데 있어 필수사항이 될 수 있다.

### □ 기계가공 공정과 환경물질 밸런스

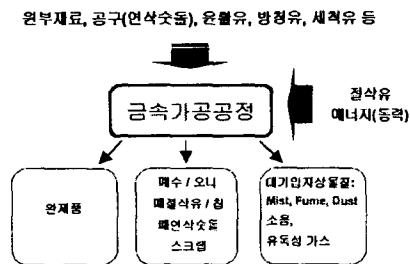


Fig. 1 Material balance for machining process

### 3. 절삭유 미립화 메카니즘

기계가공을 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 치수 정밀도 및 표면품위의 향상과 공구마멸의 감소를 통한 원가절감이 가능하게 하는 역할을 하고 있기 때문이다.

절삭유의 사용을 통한 작업환경의 악화라는 측면이 최근 강조되면서, 기계가공프로세스가 3D업종으로 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, 미국 NIOSH에서는 공기중 금속작업유의 허용노출 농도를  $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 로 제한하기 시작했다<sup>2)</sup>.

절삭유 미립자 발생과정에 대한 이해를 도모하기 위하여, 본 연구에서는 선삭공정에서 절삭유의 사용에 따른 미립자 물방울의 크기와 농도를 정량화하기 위하여 유동장원리에 따른 액체미립화이론(fluid atomization theory)과 실험적 측정에 바탕을 둔 해석모델을 제시하고자 한다.

선삭가공중 절삭유 미립자 발생은 Fig.2의 미립화 개념도에서 나타낸 바와같이, 분리(spin-off), 분산(splash), 증발(evaporation) 작용이 함께 포

함되어 일어난다.

분리(spin-off)는 부품의 회전운동에 의한 표면에서의 원심력에 의해 공작물로부터 뿜겨나와 일어난다. 실험적인 관측결과에 따르면 분리작용에 의한 미립자 발생율은 전체의 80% 이상을 차지하고 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 분산(splash)은 공구와 공작물에 절삭유 입자의 충돌에 의한 운동량의 전달로 일어난다. 증발(evaporation)은 절삭점 부근의 높은 온도에 의해 절삭유체가 증기상태로 되는 것을 말한다. 이들 각각의 미립화기구에 대한 수식화를 통해 다음과 같이 그 개념을 정리할 수 있다.

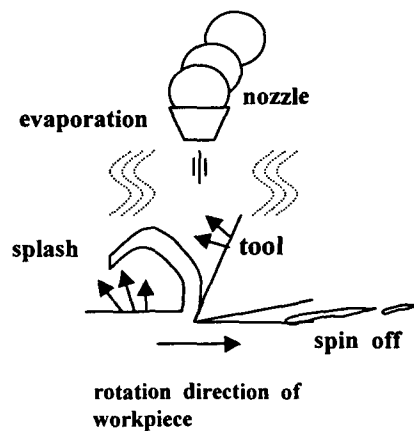


Fig. 2 Aerosol generation of cutting fluids in machining process

Fig. 3은 선삭가공시, 절삭유가 공구와 공작물상에서 비산되는 상태를 나타낸다. 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.

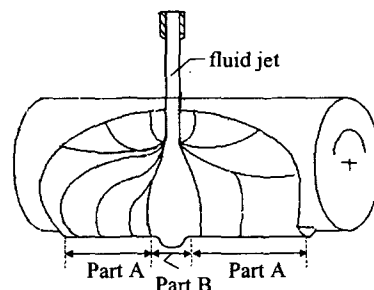


Fig. 3 Typical cutting fluid behavior in machining process

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), 물방울형성 모드(drop formation mode)의 3가지 분무형태를 갖는다.

Fig.4 는 "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, 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.

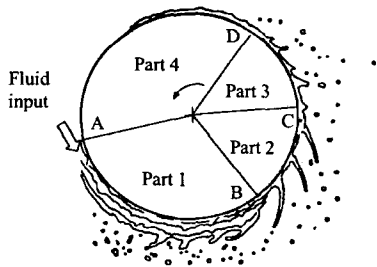


Fig. 4 Rotary disk atomization process and three formation modes

물유막형성모드(film formation mode) 에서는 물방울 직경  $D_{film}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

물방울형성모드(drop formation mode)에서는 표면

장력보다 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.5 는 원심력에 기인하는 공작물 표면에서의 유막의 분산과 교란과의 성장을 나타내는, "A"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.

#### 4. 절삭유 미립자 측정

절삭유 미립자 발생 특성을 보다 구체적으로 알아보기 위하여 미립자 측정실험을 통해 얻어진 자료들은 본 연구에서 정립한 식에 필요한 각종 계수들을 구하는데 이용되며, 예측모델의 검증 및 교정에도 이용한다.

먼저, 기계가공중 절삭유 미스트의 농도측정은 기계가공중 작업자의 작업위치에서 미립자동특성분석기(PDA: Particle Dynamics Analyzer)를 이용하여 실시간으로 측정한다.

Fig.5에는 절삭유 미립화 실험을 위한 실험장치 및 미립자동특성분석기를 설치한 상태를 보여주고 있다.

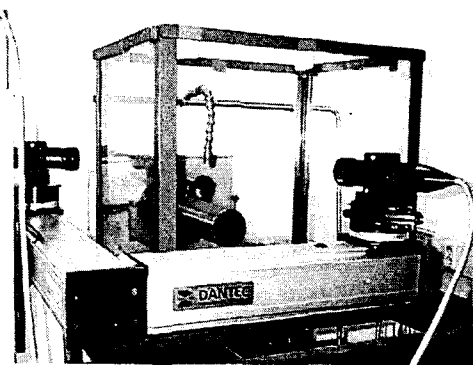


Fig. 5 Photo. of PDA system and experimental set-up for atomization characteristics analysis of cutting fluids

Fig.6 에는 PDA 장치에서 측정된 절삭유 미립자의 속도, 직경, 농도 등을 실시간으로 처리하여 화면상에 변화추이를 나타낸 결과이다.

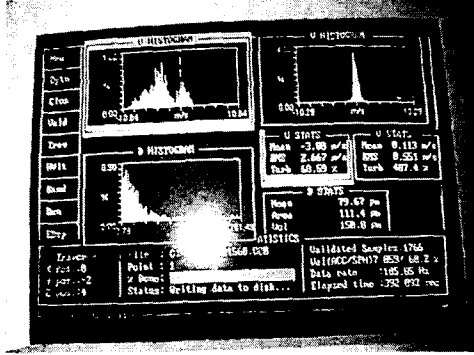


Fig. 6 Measuring results display of cutting fluid's aerosol particles average velocities and size distributions on screen

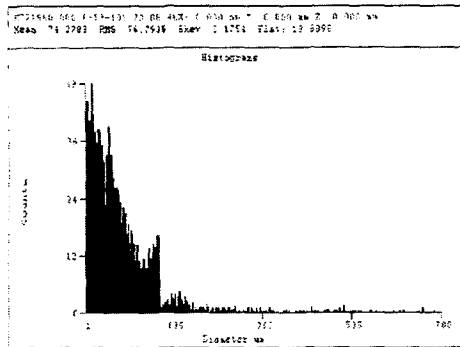


Fig. 7 Size distribution of cutting fluid aerosol particles

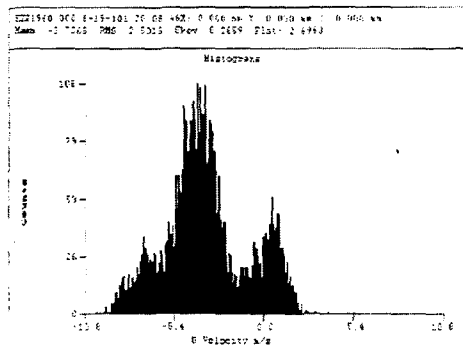


Fig. 8 Average velocity distribution of cutting fluid aerosol particles on u-direction

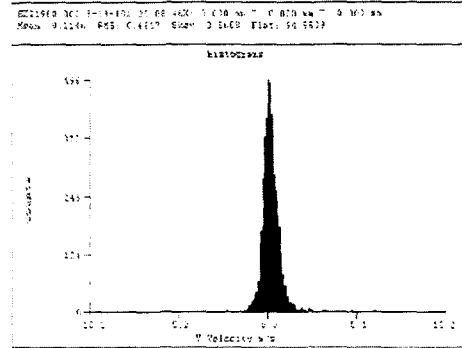


Fig. 9 Average velocity distribution of cutting fluid aerosol particles on v-direction

절삭유 미립화에 의한 미립자들의 직경, 평균속도 분포에 대한 히스토그램을 Fig.7, Fig.8, Fig.9에 각각 나타내었다. 그림에서도 알 수 있는 바와 같이, 절삭조건(공작물회전수, 공작물직경, 절삭유공급유량 등)의 변경에 따라 일정한 패턴의 직경 및 평균속도 분포 특성을 보이고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 환경친화적 기계가공시스템 구축을 위한 기반연구로서, 기계가공중 발생하는 절삭유 미립자를 환경영향인자로 설정하고 미립자의 크기, 농도를 실시간 측정된 결과를 제시하였으며, 이를 절삭유 미립자 거동특성을 고찰하였다.

이상의 결과들을 활용하여 오일-미스트 형태의 절삭유 미립자의 환경영향을 확인하고, 보다 과학적이고 계량적인 방안을 모색하여 생산성과 환경친화성이 균형있게 조화될 수 있는 환경친화적 기계가공을 구현할 수 있으리라 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 No. 2001-1-30400-026-2 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 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.