

환경친화적 기계가공을 위한 절삭유 최적화에 관한 연구

황 준*(충주대학교 기계설계학과), 정의식**(대전산업대학교 기계설계공학과),
Steven Y. Liang***(Georgia Institute of Technology)

Optimization of Cutting Fluids for Environmentally Conscious Machining

Joon Hwang*(ChungJu National Univ.), Eui-Sik Chung**(Taejon National Univ. of Technology),
Steven Y. Liang***(Georgia Institute of Technology)

ABSTRACT

This paper presents the analytical and experimental methodology for the prediction of aerosol concentration and size distribution due to cutting fluid atomization mechanism in turning operation. The established analytical model which is based on atomization theory analyzes the cutting fluid motion and aerosol generation in machining process. The impinging and evaporation experiments were performed to know the particle size and evaporation rate of cutting fluid. 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), Predictive Model(예측모델), Productivity(생산성), Environmental Impact(환경적 침해)

1. 서론

최근, 환경과 건강에 대한 관심이 고조되면서, 생산기술의 측면에서도 이러한 요구를 포함하는 제조 프로세스의 개선 또는 개발이 요구되고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위한 다각도의 연구가 선진국을 중심으로 활발히 전개되고 있는 실정이다¹⁾.

‘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 이윤배반적인 성격을 갖는 사안이기도 하다.

이와같은 시대적 요구사항의 변화에 따라 기계가공 분야에서도 ‘환경친화적 기계가공을 위한 최적화’ 문제가 크게 부상하고 있으며, 특히 미국을 비롯한 선진국에서는 수년전부터 활발한 연구가 전개되고 있다.

그런데, 최근 국내외에서 수행되고 있는 연구방향들은 일반적으로 절삭유의 사용을 배제한 상태에서 시의 기계가공, 즉 냉풍을 이용하여 절삭유의 냉각

효과를 대체하는 연구, 공구재질을 개선하여 건절삭을 시도하는 연구 등이 주종을 이루고 있으나, 윤활 효과를 보다 보완하기 위한 연구의 필요성도 제기되고 있다.

또한, 그 간의 경험으로 비추어 볼 때, 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 치수정밀도 및 표면품질의 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 작업환경에 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) 운할에서는 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 것으로 최근에 미국 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서는 허용기준을 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 환경규제를 강화하고 있다²⁾.

따라서, 본 연구에서는 절삭유 사용이 갖는 장점을 최대한 살리는 동시에, 환경친화적 기계가공을 위한 기초연구로써, 최적의 절삭유 공급·제어장치를 개발하기 위한 과학적 기초자료를 정비하고, 관련기술을 확보하며, 기계가공성능과 환경기준을 동시에 충족하는 최적의 절삭유 미립자 형성·제어방법을 제안하고자 한다.

구체적으로는, 최적의 절삭유 미립자 형성·제어를 이룩하기 위하여 절삭유 미립자 발생원의 기본 메카니즘을 확립하고, 다양한 절삭조건하에서 절삭유 미립자의 양을 추정할 수 있는 예측모델을 개발하고자 한다. 또한, 개발된 예측모델을 이용하여 기계가공성능 향상과 환경침해방지 측면에서의 환경기준을 동시에 만족시킬 수 있는 절삭유 사용제어에 관한 최적화 방법론을 제시하고자 한다.

2. 절삭유 미립화 기구

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.

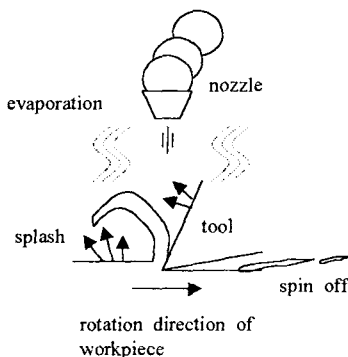


Fig. 1 Aerosol generation of cutting fluids in machining process

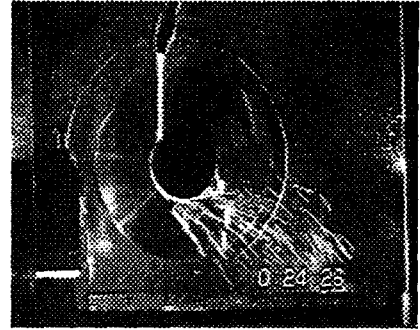


Fig. 2 Photo. of impinging test of cutting fluids in turning process

선삭가공중 절삭유 미립자 발생은 Fig.1의 미립화 개념도에서 나타낸 바와같이, 분리(spin-off), 분산(splash), 증발(evaporation) 작용이 함께 포함되어 일어난다³⁾.

이러한 개념은 선삭가공중 절삭유 충돌실험서 고속카메라 촬영을 통해 Fig.2와 같은 절삭유거동을 확인할 수 있다.

분리(spin-off)는 부품의 회전운동에 의한 표면에서의 원심력에 의해 공작물로부터 튕겨나와 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 접촉유체가 증기상태로 되는 것을 말한다. 이들 각각의 미립화기구에 대한 수식화를 통해 다음과 같이 그 개념을 정리할 수 있다.

2.1 분리기구(spin-off mechanism)

Figure 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. 즉 절삭유 미립자의 형성과정은 유체흐름장해석과 유체분무이론에 의한 회전원판과 얇은 유막형태로 취급할 수 있다.

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), 물줄기형성모드(ligament formation mode), 물방울형성모드(drop formation mode)의 3가지 분무형태를 갖는다.

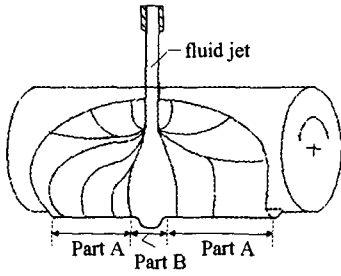


Fig. 3 Typical cutting fluid behavior in machining process

Figure 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.

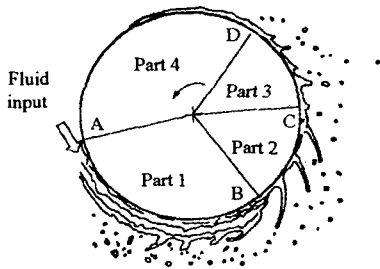


Fig. 4 Rotary disk atomization process and three formation modes

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:

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

Figure 2 는 원심력에 기인하는 공작물 표면에서의 유막의 분산과 교란파의 성장을 나타내는, "B"부분에서의 얇은 유막분무작용의 과정을 보여준다. Rayleigh의 표면파 이론(surface wave theory)에 따르면, 물방울 체적은 박판파(sheet wave)와 같다.

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

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

2.2 분산기구(splash mechanism)

분산은 충돌분사에서 외란의 크기에 의해 발생하는 비선형 불안정 현상을 말하며, 분사속도, 이동거리, 분사직경 같은 매개변수는 모두 외란을 일으키는데 작용한다.

분산된 물방울을 형성하기 위해 필요한 에너지는 유체분사 표면교란에 의해 주어진다. 그 결과 물방울의 직경은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_m = \frac{1}{N} (15.6) Q^{0.5} \left(\frac{\sigma}{d_v \rho} \right)^{0.4} \quad (5)$$

2.3 증발기구(evaporation mechanism)

기계가공중 공급된 절삭유가 고온의 절삭점에 접촉하게 될 때 절삭유는 증발하게 되며, 액체 증발율(η)는 Hertz-Knudsen 모델로부터 유도할 수 있다.

$$\eta = k_1 \Phi(D_a) \cdot \left[\frac{P_{tr}}{\sqrt{T_{tr}}} - \frac{P_{atm}}{\sqrt{T_v}} \right] \quad (6)$$

또한, 증발기구는 절삭온도 해석과 실시간 측정을 통해 공구-공작물-칩으로 유입·전달된 절삭열량과 열전달 거동을 분석하고, 열원증발실험(heat source evaporation test)를 통해 Hertz-Knudsen 모델의 증발계수를 구해 실제 증발율을 예측할 수 있다.

본 연구에서 정리·제시한 절삭유의 미립화기구는 기계가공시 공급되는 절삭유와 공구-공작물-칩으로 구성된 절삭기구와의 상호작용에 의해 발생되고 있음을 알 수 있으며, 그동안 경험적으로 사용되어 왔던 절삭유와 그 효과에 대한 재인식이 필요함을 강조하고 있다. 또한, 생산성과 환경적인 측면을 동시에 고려하는 환경친화적 기계가공시스템 개발을 위해서는 이와같이 미시적인 절삭유의 거동을 충분

히 이해하는 것이 필요하며, 이를 바탕으로 보다 효과적인 최적화 방안이 마련될 것이다.

3. 절삭유 미립자 측정 및 평가

3.1 충돌실험에 의한 측정

이상에서 정립한 절삭유 미립화기구를 보다 구체적으로 규명하고, 예측모델확립을 위해서는 각각의 미립화기구(분리, 분산, 증발)에 대한 별도의 실험이 요구된다. 또한, 미립자 측정실험을 통해 얻어진 자료들은 본 연구에서 정립한 식에 필요한 각종 계수들을 구하는데 이용되며, 예측모델의 검증 및 교정도 이용한다.

먼저, 기계가공중 절삭유의 미립자의 측정은 위상 도플러 효과(phase doppler effect)를 이용한 PDA (Particle Dynamic Analyzer)를 사용하여 미립자의 평균속도, 직경 및 농도를 실시간으로 측정한다. PDA를 이용하여 측정된 절삭유 미립자의 크기와 평균속도 분포도를 Fig.5에 나타내었다.

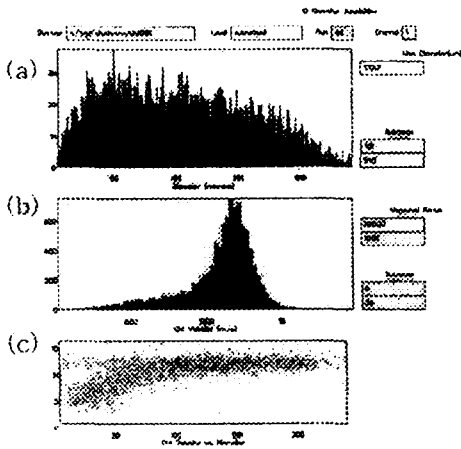


Fig. 5 Typical data outputs of PDA for aerosol size and concentration

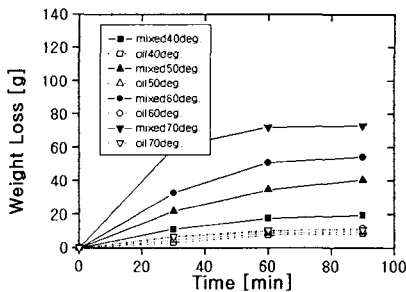


Fig. 6 Comparison of cutting fluid evaporation rate with respect to time

3.2 증발실험에 의한 측정

절삭열 및 온도에 의해 절삭유가 미립화되는 현상, 즉 증발현상에 대한 측정은 열원증발실험을 통해 비절삭상태에서 이루어질 수 있으며, Fig.6에 나타낸 바와 같이, 2 종의 절삭유를 이용하여 온도와 시간의 함수로 증발계수를 구할 수 있다. 온도를 40℃~70℃로 변경할 경우, 순수 oil형태의 절삭유보다 수용성의 mixed oil의 증발량이 시간에 따라 급증하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 환경친화적 기계가공시스템 구축을 위한 기초연구로서, 기계가공중 발생하는 절삭유 미립자를 환경영향인자로 설정하고 미립자의 크기, 농도를 예측하기 위한 예측모델을 제시하였으며, PDA와 증발실험장치를 이용하여 실험적 검증을 시도하였다. 본 연구에서 얻어진 모델을 바탕으로 Fig.7과 같은 절삭유 사용의 최적화가 가능하리라 판단되며, 이를 통해 생산성과 환경친화성이 균형있게 조화된 환경친화적 기계가공을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

$$\max(p)\{\max(q)[(R+T+L)/(S+C)]\} \quad (7)$$

여기서, R, T, L, S, C : object elements;
p, q : control parameters

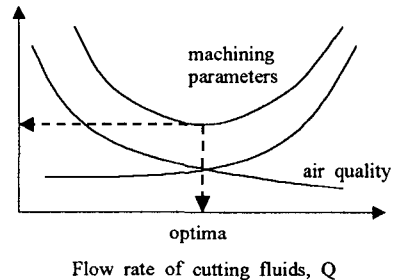


Fig. 7 Optimization strategy of cutting fluid in achieving a balanced productivity and environmental consciousness

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.