

Dual-PDA를 이용한 절삭유 에어로졸 특성분석에 관한 연구(II) - 선삭공정의 절삭유 에어로졸 예측

A Study on the Characteristics Analysis of Cutting Fluid Aerosol Using Dual-PDA System(II) - for Cutting Fluid Aerosol Prediction in Turning Process

황 준*, 정의식*, 황 덕철**, 우 창기**
J. Hwang*, E. S. Chung*, D. C. Hwang**, C. K. Woo**

Abstract

This paper presents the analytical approaches to predict cutting fluid aerosol formation characteristics in machining process. The prediction model which is based on the rotary atomization theory analyzes aerosol behaviors in terms of size and concentration. Experiments were carried out to verify the aerosol formation prediction model under various operational conditions. The experimental results which are obtained by Dual-PDA measurement show reasonable agreement with prediction results of aerosol concentration. This study can be provided as a basis to estimate and control the hazardous cutting fluid aerosol in machining process in view of environmental consciousness.

주요기술용어 : Cutting Fluid Aerosol (절삭유 에어로졸), Dual-PDA(Dual-Particle Dynamics Analyzer), Cutting Fluid Aerosol Formation Prediction Model (절삭유 에어로졸 형성 예측모델)

1. 서론

기계가공품질 향상과 생산성 제고 측면에서 폭넓게 사용되고 있는 절삭유는 절삭기구와 공작 기계구동 메커니즘에 의해 매우 복잡한 형태의 절삭유에어로졸을 발생시킨다.

특히, 이때 발생하는 절삭유 에어로졸은 대기 중에 장·단시간 부유하다가 사업장내 주변과

공작기계를 오염시키며, 실내 대기오염으로 인해 근로자에게 호흡기 질환을 유발시킬 수 있으며, 과도한 절삭유 사용은 피부독 등 피부질환의 원인이 될 수 있다고 보고되고 있다.¹⁾

또한, 절삭유는 광물성, 식물성 또는 석유계 합성오일을 기유(base oil)로 하여 윤활특성을 향상시키기 위해 극압첨가제를 비롯한 각종 첨가물질이 함유되어 있다. 고정밀 부품 및 금형에 대한 요구수준이 높아지면서, 가공정밀도 향상을 위해 많은 량의 절삭유가 실제 기계 가공시에 사용되고 있으며, 이는 곧 절삭유 에어로졸 발생에 의한 환경, 위생, 안전(EHS: Environment, Health, Safety) 측면에서의 시급

+ 책임저자, 충주대학교 기계공학부

E-mail : jhwang@chungju.ac.kr

Tel : 043-841-5376

* 한밭대학교 기계공학부

** 인천대학교 기계공학과

한 대책마련을 필요로 하게 되었다.

그러나, 현재까지 공정 중에 발생하는 절삭유 에어로졸 형태의 오일-미스트(oil-mist), 흠(fume)등에 대해서는 총체적인 대기오염의 측면에서만 다루어져 왔을 뿐, 보다 근본적인 저감이나 제거를 위한 대책수립을 위하여 구체적인 연구는 그다지 많이 이루어지지 못한 상태이다.¹¹⁾

최근, 선진국을 중심으로 이러한 절삭유 에어로졸에 대한 폐해 및 대책마련의 일환으로 작업장내 대기환경영향을 평가하기 위한 지표로서 공기 중의 에어로졸 입경과 농도에 대한 기준을 마련하였으며, 미국 NIOSH에서는 공기중 금속작업유의 허용노출 농도를 0.5 mg/m³ 로 권고하기 시작했다¹²⁾.

또한, 이와 관련한 국외관련연구로서 Bennett¹³⁾ 등에 의해 금속가공액 미립자가 작업현장의 청결성과 작업자의 건강에 미치는 영향에 대하여 보고하였으며, Howes¹⁴⁾ 등은 연삭액의 유독성과 그 처리방법에 대하여 조사하여 환경친화적 관점에서 연삭유 유해성에 대한 광범위하고 계통적인 연구의 필요성을 강조하였다. Yue¹⁵⁾ 등은 폐기물 유출을 유발하는 절삭유의 분산과 분무작용에 있어서 임계조건을 구하기 위한 절삭유 미스트 형상모델을 제안하였다. 한편, 국내에서는 Hwang¹⁶⁾ 등에 의해서 절삭유 미립화 현상과 에어로졸 발생에 따른 문제점들이 소개되어 연구되기 시작하였으며, 미립화 메커니즘에 대하여 보다 심도있는 연구가 필요함을 인식하기 시작하였다.

본 연구에서는 작업자의 호흡기 질환 및 피부 질환 발생을 유발시켜 작업자의 안전에 영향을 미치면서도 그 제어가 가장 어려운 절삭유 에어로졸의 거동특성을 분석하고 예측하기 위하여 액체 미립화 이론을 근간으로 한 절삭유 에어로졸 예측모델을 확립하였다. 본 모델을 이용하여 에어로졸 농도분포를 예측하였으며, 에어로졸 농도측정실험을 통해 예측결과와 비교함으로써, 미립자 발생에 대한 대책수립에 응용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 절삭유 미립화 기구

절삭유 미립화 기구는 크게 3가지 메커니즘으로 구성된다. Fig.1 에 나타난 바와 같이 첫째, 공작물표면상을 흐르는 절삭유가 공작물의 회전원심력으로 인해 반경방향으로 유막이 분리되면서 미립화 되는 회전분리기구(spin-off mechanism)와 둘째, 공구나 공작물과 절삭유가 직접적으로 충돌하면서 운동량 전달로 인해 미립화 되는 충돌분산 기구(splash mechanism), 셋째, 높은 절삭온도의 절삭점(cutting point)에 절삭유가 접촉하면서 미립화 되는 증발기구(evaporation mechanism)로 나누어 볼 수 있다.^{15,16)}

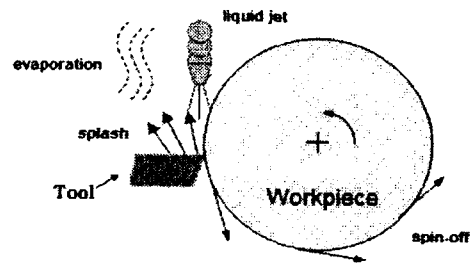


Fig. 1 Cutting fluid aerosol generation process in turning operation

공작물의 회전원심력에 의해 공급된 절삭유가 원주방향을 따라 미립화하는 현상을 회전미립화기구(rotary atomization process)로 모델링할 수 있으며, 그 개략도를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.¹⁷⁾

Figure 2에 나타난 바와 같이, 절삭유 제트 분류 상의 중심부 (Part B)는 회전원판 형상을 형성하며 미립화 되는 반면, 바깥부분(Part A)은 낮은 유속으로 인해 박판의 유막을 공작물 표면에 형성하게 된다. 또한, Fig.3 에 나타난 바와 같이, 절삭유 노즐로부터 공급된 절삭유 액주는 A 점으로부터 공작물과 접촉하면서 공작물 표면을 따라 회전하면서 흐르게 된다. Part 1 부분에서 액막을 형성하면서 공작물과 함께 회전하게 되며, 이때 액막으로부터 절삭유가 미립화되는 액막형성모드(film formation mode)와 공작물 표면에 잔류하는 절삭유가

Part 2 지점을 통과하면서 액주(ligament)를 형성하게 되고, 이로부터 에어로졸이 생성되는 액주형성모드(ligament formation mode)가 존재한다. 또한, Part 3에서는 소량의 절삭유만이 공작물 표면상에서 미립화 되는 액적형성모드(drop formation mode)에 의해 절삭유는 작은 에어로졸 형태로 대기중에 분산된다. 또한, 잔류 절삭유는 D 점을 통과하여 Part 4에서 코팅액막층(coating liquid layer)을 형성하면서 공작물과 함께 회전하게 되고, 공급되는 절삭유 액주와 다시 충돌하게 된다.

이러한 물리적 특성으로 인해 절삭유 미립화 현상은 공작기계 운전조건과 사용되는 절삭유의 물성에 좌우될 것으로 판단되며, 구체적으로는 절삭유 공급유량, 회전각속도에 영향을 주는 인자(주축회전수, 공구 또는 공작물의 직경), 절삭유 물성(표면장력, 밀도 등) 등에 직접적인 영향을 받을 것이다.

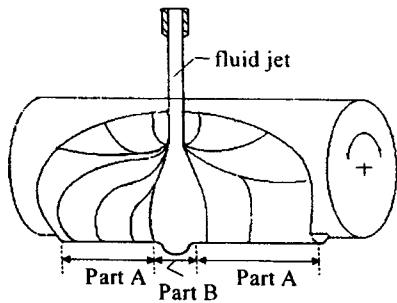


Fig. 2 Cutting fluid behavior on workpiece and spin-off motion in machining process

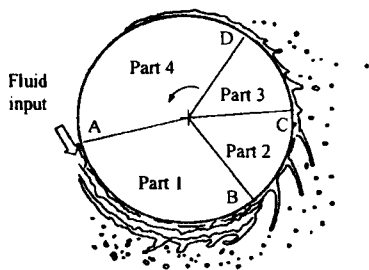


Fig. 3 Rotary atomization process of cutting fluid around the workpiece in turning

3. 절삭유 에어로졸 예측모델

액막형성모드(Fig.3(Part1))는 작용 유체의 유량이 클 때 발생하며, 주변 공기간섭에 의해 액막은 작은 에어로졸로 분리된다. 에어로졸직경 D_{film} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다^{17,19)}.

$$D_{film} = \frac{105}{1.7} \frac{Q_{film}^{0.5} \sigma^{0.4}}{\omega R_w^{0.8} \rho^{0.4}} \quad (1)$$

여기서, Part 1의 유량은,

$$Q_{film} = Q_{disk} - Q_{2-3} \quad (2)$$

B점에서의 액막형성모드와 액주형성모드 사이 임계유량은 다음과 같다.

$$Q_{2-3} = C_2 \times 0.68\pi R_w^2 \sqrt{v\omega} R_c^{0.667} W_c^{-0.883} \quad (3)$$

액주형성모드(Fig.3 (Part 2))는 액막형성모드에서 보다 적은 유체유량이 작용할 때 발생하며, Fig.4에 나타낸 바와 같이, 공작물 원주 주위에 많은 불안정한 액주가 형성된 후 작은 액적으로 분리된다.

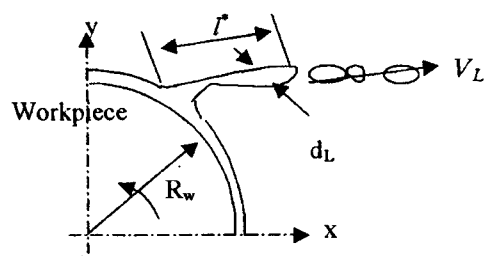


Fig. 4 Ligament formation mode of cutting fluid aerosol in spin-off mechanism

액주의 길이는,

$$l^* = \frac{V_L^2 R_w}{2(\omega R_w + V_\theta)^2} \quad (4)$$

액주의 폭과 액주의 직경과의 관계는,

$$D_{ligament} = 1.88d_L \quad (5)$$

여기서, 액주의 직경은,

$$d_L = \sqrt{\frac{4Q_{ligament}}{\pi N_L V_L}} \quad (6)$$

액주의 수는,

$$N_L = C_N(0.574)R_c^{1/3}W_c^{1/4} \quad (7)$$

또한, 액주형성모드에서의 유량변화는,

$$Q_{ligament} = Q_{2-3} - Q_{1-2} \quad (8)$$

여기서, C점에서의 임계유량 Q_{1-2} 는,

$$Q_{1-2} = C_1 \times 0.192\pi R_w^2 \sqrt{\nu\omega} R_c^{0.95} W_c^{-1.15} \quad (9)$$

또한, 작용 액체의 관성력, 점성력, 표면장력등은 미립자 형성과 깊은 관련이 있으며, 이와 관련하여 Reynolds number와 Weber number 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_c = \frac{(\omega R_w + V_\theta) R_w}{\nu} \quad (10)$$

$$W_c = \frac{\rho(\omega R_w + V_\theta)^2 R_w}{\sigma} \quad (11)$$

따라서 액주형성모드에서의 에어로졸 직경은⁽⁷⁾,

$$D_{ligament} = C' R_w \left(\frac{1}{N_L} \right) \left(\frac{\rho Q_{ligament}^2}{R_w^3 \sigma} \right) W_c^{-2/7} \quad (12)$$

여기서, C' 는 실험적으로 구해지며, 회전미립화기구에서는 약 1.23의 값을 갖는다⁽⁷⁾.

액적형성모드(Fig.3 (Part 3))는 공작물 표면을 따라 절삭유량이 급격히 감소하면서 발생하며, 상대적으로 균일한 에어로졸이 형성되어 원심력이 표면장력 보다 클 때 공작물 표면 가장자리로부터 원심분리되어 생성되는 에어로졸 직경은 다음과 같다⁽⁷⁾.

$$D_{drop} = \sqrt{6 \left(\frac{\sigma}{\rho} \right)^{1/2} \left(\frac{R_w}{(V_\theta + \omega R_w)^2} \right)^{1/2}} \quad (13)$$

또한, 원통형의 공작물 원주상의 흐름속도

는 다음과 같다.

$$V_\theta = 2V \sin\theta + \frac{\Gamma}{2\pi R_w} \quad (14)$$

여기서, $\Gamma = 2\pi\omega R_w^2$, θ 는 절삭유 흐름방향과 공작물과 접촉된 반경방향의 각을 나타낸다.

또한, 공작물을 따라 흐르는 절삭유 부분(Fig.2 (Part A))은 절삭유량이 어느 임계값 보다 클 때 원심력에 의해 공작물 표면에서 액막으로 분리되면서 난류 상태의 유체흐름이 발생하는데 이와같은 박판액막미립화(liquid sheet atomization) 현상은 Fig.5과 같이 액막이 어느 임계값의 물결크기에 도달하면 분리되고, 분리된 액막으로부터 에어로졸이 발생하게 된다.

Figure 5에 나타난 모델로부터, 액막두께 $2h_1$, 액막폭 λ^* 가 액주 직경 d_L 로 변환된다면,

$$\pi \frac{d_L^2}{4} = 2h_1 \lambda^* \quad \text{의 관계를 갖으며, 에어로졸 입경}$$

은 구의 체적과 직경 d_L 과 길이 λ_1 인 원통의 체적으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\pi D_{sheet}^3}{6} = \frac{\pi d_L^2}{4} \lambda_1 \quad (15)$$

여기서, 물결길이 $\lambda_1 \approx 4.5d_L$

이상으로부터, 액막미립화에 의한 액적입경은,

$$D_{sheet} = 2.12 \sqrt{2h_1 \lambda^*} \quad (16)$$

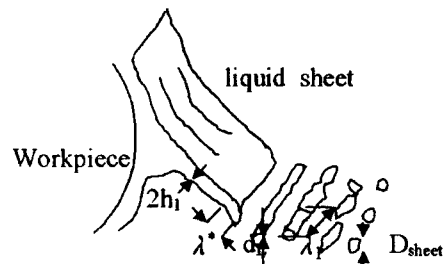


Fig. 5 Liquid sheet disintegration of cutting fluid spin-off mechanism

이상과 같이, 기계가공공정에서 사용되는 절삭유는 복합적인 에어로졸 형성기구에 의해 형성되는 만큼 절삭유 에어로졸 입경은 그 크기가 일정하지 않을 것으로 판단된다.

따라서 이러한 절삭유 미립자 현상과 미립자 입경 분포를 효과적이고 안정적으로 예측하기 위하여 확률개념의 미립자 분포 모델이 필요하다. 본 연구에서는 Rosin-Rammler 분포 함수⁽⁷⁾를 사용하여 절삭유 에어로졸의 직경분포의 상관성을 구함으로써 조건변화에 따른 미립자 특성을 예측해 볼 수 있다.

$$\phi(D) = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{D}{X}\right)^\theta\right] \quad (17)$$

가공시 발생하는 절삭유 미립자 발생률 \dot{n} 은 단위체적 및 단위시간당 미립자 발생률로서 정의할 수 있다. 회전분리기구에서 발생하는 절삭유 미립자 발생률은 각 발생모드에서 절삭유의 유입, 유출량의 차에 비례하여 발생하게 된다^(7,8).

즉, $\dot{M} = \rho(Q_{input} - Q_{output})$ 이므로, 각 형성 모드에서의 유체질량변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

액막형성모드에서는

$$\dot{M}_f = \rho(Q_{disk} + Q_{cooling-disk} - Q_{2-3}) \quad (18)$$

액주형성모드에서는

$$\dot{M}_f = \rho(Q_{2-3} - Q_{1-2}) \quad (19)$$

액적형성모드에서는

$$\dot{M}_d = \rho(Q_{1-2} - Q_s) \quad (20)$$

박판액막형성모드에서는

$$\dot{M}_s = \rho Q_s \quad (21)$$

따라서 에어로졸 발생률은 다음과 같다.

$$\dot{\eta} = \dot{M}_f \phi_f(D) + \dot{M}_d \phi_d(D)$$

$$+ \dot{M}_s \phi_s(D) + \dot{M}_c \phi_c(D) \quad (22)$$

전체 절삭유 미립자 농도 η 는 단위체적 내에 발생된 에어로졸 총량으로 정의하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\eta = \frac{\dot{\eta} \Delta t}{VOL} \quad (23)$$

발생된 절삭유 미립자는 공작기계 주변과 작업장 내에 발생점으로부터 구(sphere) 형태로 동일 반경에 일정한 농도를 나타내게 되며, Fig.6과 같은 확산 모델을 이용하여 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta(s,t) = \eta_0 + \frac{\dot{\eta} R^2}{D_{AB} s} \times \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{s-R}{\sqrt{4D_{AB}t}}\right) - \exp\left(\frac{s-R}{R} + \frac{D_{AB}t}{R^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{s-R}{\sqrt{4D_{AB}t}} + \frac{\sqrt{D_{AB}t}}{R}\right) \right] \quad (24)$$

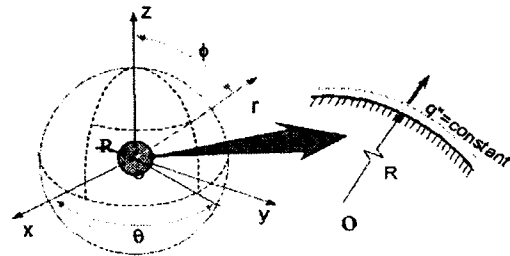


Fig. 6 Schematic model for cutting fluid aerosol dispersion behavior

4. 절삭유 미립자의 측정 및 평가

본 연구에서는 절삭유 미립화에 의한 에어로졸 발생 특성을 정량적으로 고찰하기 미립자 정밀 측정 실험장치를 활용한 실험을 실시하였다. 특히 회전분리기구에 의한 절삭유 미립자 거동

특성을 고인하기 위하여 운전조건에 따른 절삭유 에어로졸 입경 분포, 평균속도, 농도 등을 실시간으로 측정하고 그 결과를 분석하였다.

공작물 주변에 발생하는 절삭유 에어로졸 거동을 측정하기 위해서는 Fig.7에 나타낸 바와 같은 위상 도플러 원리를 이용하여 미립자 거동을 측정할 수 있는 Dual-PDA(Dual Particle Dynamics Analyzer, Dantec/Invent) 시스템을 사용하였으며, 2차원의 에어로졸 속도, 입경을 실시간으로 측정할 수 있다.

이 측정장치는 Ar-Ion 레이저 소스에서 공급된 레이저빔은 transmitter로 보내져 검사체적 초점을 형성하게 된다. 이때, 검사체적을 통과하는 최대속도 470m/s, 입경 0.4 μm~900μm 범위의 절삭유 에어로졸이 receiver를 통해 측정된다. 측정신호는 신호처리장치(58N80 Multi-PDA signal processor)와 소프트웨어인 Sizeware를 통해 절삭유 에어로졸의 평균속도, 입경값이 실시간으로 계산되고 컴퓨터상에 저장되어 분석된다.

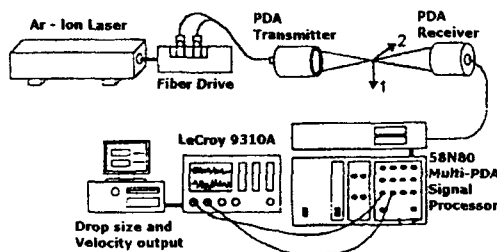


Fig. 7 Dual-PDA system for measuring cutting fluid aerosol particles behavior

실험에 사용된 절삭유는 수용성 절삭유 W2종(Rocol 370+)로 5% 농도로 희석하여 직경 Φ3mm 절삭유 공급노즐을 이용하여 물줄기 형태로 최대 18 lpm으로 공급하였으며, 공작물 직경은 Φ50~Φ100mm, 주축회전수는 1000 rpm ~ 2000 rpm 조건으로 실험을 실시하며, 에어로졸 입경과 농도를 측정하여 예측결과와 비교하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 절삭유 미립자 입경 분포특성

전 측정범위에서 측정된 전체 절삭유 미립자 중 약 80% 이상이 100 μm 이내에 미립자 입경을 갖는 것을 알 수 있었으며, 그 이상의 미립자 입경을 갖는 것들도 소수 분포하고 있음을 확인하였다⁸⁾.

본 연구에서는 Rosin Rammler 분포함수를 적용하여 측정된 절삭유 미립자의 분포특성을 반영하는 계수값을 구하고, 미립자 발생률 예측에 활용하였다. 측정된 미립자 입경분포로부터 얻어진 Rosin Rammler 분포함수의 distribution parameter (δ)는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이, 3.41 ~ 3.84 사이의 값을 나타내었으며, 관련연구⁷⁾에서 알려진 $\delta = 2 \sim 4$ 의 범위내에 값이 존재함을 알 수 있었다.

δ 값은 절삭유 에어로졸 입경을 예측하는데 있어서 매우 중요한 계수이며, 주축회전수, 절삭유량, 공작물직경 등의 가공조건에 의해 변화됨을 알 수 있었다. 또한, 주축회전수와 절삭유량이 증가할수록 미소 절삭유 미립자 발생빈도가 상대적으로 증가하면서 δ 값이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 유량이 적을수록 주축회전수 변화가 δ 값에 미치는 영향은 커지는 것으로 판단된다.

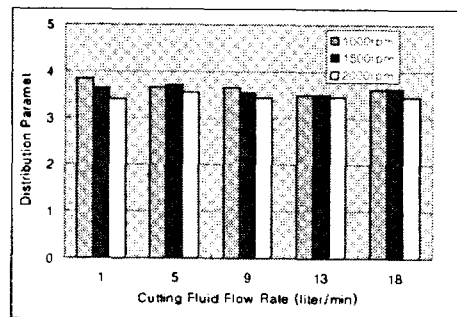


Fig. 9 Variation of distribution parameter(δ) of Rosin-Rammler function with respect to cutting fluid flow rate and rotational speed of workpiece

3.2 절삭유 미립자 농도분포 예측 및 검증

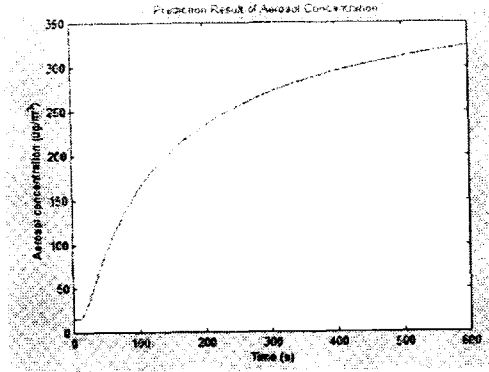
본 연구에서 확립한 절삭유 에어로졸 형성 예측모델을 바탕으로 절삭유 에어로졸 농도 예측 프로그램을 개발하고, 절삭유 사용정보, 가공 조건에 따른 절삭유 확산농도를 예측하였다.

절삭유 미립자가 발생되는 발생점으로 부터 운전시간 증가에 따른 절삭유 미립자 농도분포 변화의 예측결과를 Fig.10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 주축회전수 증가에 비례하여 절삭유 미립자 농도는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 예로써 주축회전수 2000 rpm, 절삭유량 18 lpm 의 조건에서 600 sec 운전시 절삭유 미립자 농도는 약 0.47 mg/m^3 에 도달하는 것으로 예측되었다. 또한, 본 연구에서 채택한 조건에서는 200 sec 이내에 절삭유 미립자 농도는 급격히 증가하는 경향의 미립자 발생을 보이고, 이 또한 조건에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

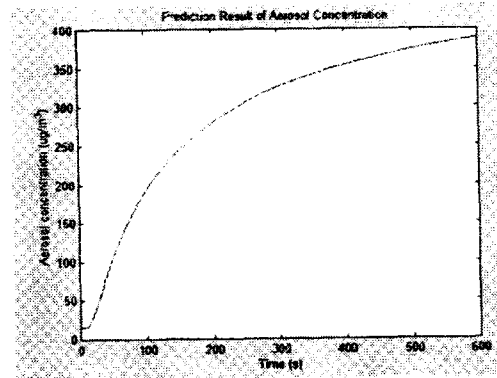
이러한 예측결과에 대한 검증을 위해 Fig.11에 농도측정결과를 나타내었다. Figure 10과 동일한 운전조건하에서 측정된 결과로부터 예측결과와 잘 일치하고 있음을 보이고 있어, 본 연구에서 확립한 절삭유 미립자 예측모델의 활용성을 검증할 수 있었다.

또한, 측정결과로부터 알 수 있는 바와 같이, 절삭유 미립자농도 총량 및 단위시간당 미립자 발생량은 주축회전수 증가에 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있으며, Fig. 11(c)와 같은 조건에서는 연속가공조건에서 약 200 sec 이후면 약 0.5 mg/m^3 에 도달할 수 있음을 확인할 수 있었다.

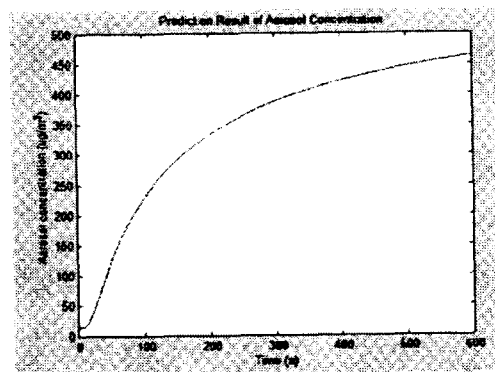
본 예측모델을 이용하여 향후 기계가공공정에 있어 절삭유 미립자 발생에 따른 환경영향을 예측할 수 있어, 작업환경악화 및 작업장내 대기오염을 최소화할 수 있는 운전조건 설정 및 방재노력을 보다 체계적으로 수행하는데 활용할 수 있을 것으로 기대한다.



(a) 1000rpm

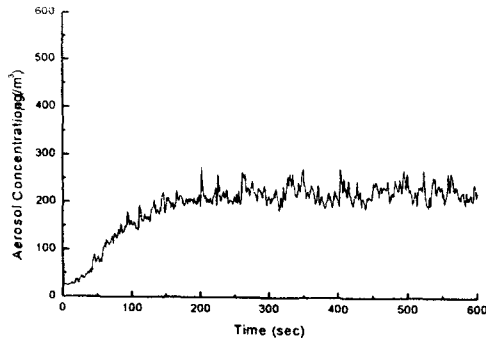


(b) 1500 rpm

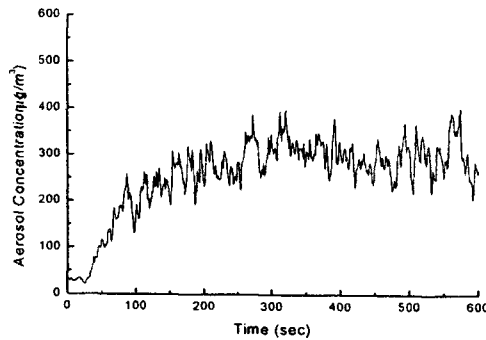


(c) 2000rpm

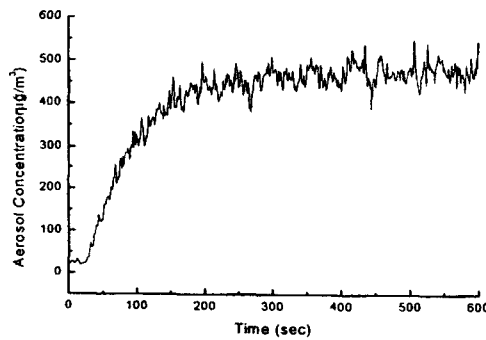
Fig. 10 Prediction results of cutting fluid aerosol concentration with respect to rotational speed of workpiece (18 lpm, $\Phi 50$, 600sec)



(a) 1000 rpm, 18 lpm, Φ50 mm



(b) 1500 rpm, 18 lpm, Φ50 mm



(c) 2000 rpm, 18 lpm, Φ50 mm

Fig. 11 Comparison of concentration of cutting fluid aerosol with respect to rotational speed of workpiece

6. 결론

본 연구에서는 환경친화적 기계가공 기술개

발을 목표로 기계가공공정에서 발생하는 절삭유 미립자 발생특성을 반영하는 절삭유 미립화 예측모델을 확립하였으며, 예측모델에 대한 검증 을 위한 절삭유 미립자 입경과 농도에 대한 정밀측정을 수행하였다.

본 예측모델을 이용하여 절삭유 미립자 발생농도를 예측할 수 있었으며, 이를 통해 기계가공 공정에서 절삭유 미립자 발생에 따른 작업장 대기환경오염과 작업자 호흡기 안전측면에서의 방재가 가능한 환경친화적 기계가공공정의 설정이 한층 가능해지리라 기대한다.

향후, 보다 다양한 기계가공환경 및 방법에 따른 환경영향을 평가할 수 있는 연구를 지속함으로써, 공정상 존재하게 되는 환경위해 영향요소를 과학적으로 분석하고, 이를 통해 적절한 환경친화적 기계가공 공정개선 및 개발에 필요한 대책마련이 가능하리라 사료된다.

Nomenclature

- Q_{disk} : input flow rate at point A, m^3/s
- Q_{film} : flow rate in film formation mode, m^3/s
- $Q_{ligment}$: flow rate in ligament formation mode, m^3/s
- Q_s : flow rate in liquid sheet, m^3/s
- Q_{2-3} : critical flow rate between ligament and drop formation mode, m^3/s
- Q_{1-2} : critical flow rate between film and ligament formation mode, m^3/s ,
- N_L : number of ligaments
- l^* : length of ligament, m
- R_w : workpiece radius, m
- Re : reynolds number
- We : Weber number
- V_L : velocity of ligament, m/s
- V_θ : velocity of surface fluid relative to rotational

speed, m/s
 θ : contact angle between
 σ : surface tension, KJ/m³
 ρ : fluid density, kg/m³
 ω : rotational speed of workpiece, rad/s
 h_1 : half thickness of liquid sheet, m
 λ^* : width of liquid sheet, m
 $\phi(D)$: fraction of the total volume contained
 in
 drops of diameter less than D
 X : size parameter
 δ : distribution parameter
 M_f, M_l, M_d, M_s : mass change in film,
 ligament, drop sheet aerosol formation
 mode
 $\phi_f(D), \phi_l(D), \phi_d(D)$: Rosin Rammler
 function
 of each formation mode
 D : cutting fluid's aerosol particle diameter,
 m
 n : number of aerosol particle
 R : spherical radius of aerosol dispersion
 s : spherical distance from aerosol
 generation source
 D_{AB} : binary mixture dispersion coefficient
 VOL : control volume size of machine tool, m³
 Δt : operation time, sec
 η_0 : initial aerosol concentration in control
 volume
 $\dot{\eta}$: cutting fluid aerosol generation rate
 η : total cutting fluid aerosol concentration

2. U.S. Department of Health and Human Services, "Occupational Exposure to Metal working Fluids," NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) Publication, 1998, No.98-102.
3. Bennett, E. O., Bennett, D. L., "Occupational Airway Diseases in the Metalworking Industry," Trib. Int., 18/3, pp.169-176, 1985.
4. Howes, T. D., Tonshoff, H. K., Heuer, W., "Environmental Aspect of Grinding Fluids," Annals CIRP, 40/2, pp.623-630, 1991.
5. Yue, Y., Sutherland, J. W., and Olson, W. W., "Cutting Fluid Mist Formation in Machining via Atomization Mechanism," ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceeding of Symposium on Design for Manufacturing and Assembly, DE-Vol.89, pp.37-46, 1996.
6. Hwang, J., Chung, E. S., "Optimization of Cutting Fluids for Environmentally Conscious Machining", Korean Society of Precision Engineering Annual Conference, Vol.2, pp.948-951, 2000.
7. Bayvel, L., Orzechowski, Z., "Liquid Atomization," Taylor & Francis, 1993.
8. Hwang, J., Chung, E. S., Liang, S. Y., "Experimental Analysis of Cutting Fluid Aerosol Behavior in Machining Process", Proceedings of the 7th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia, pp. 92-97, 2002.
9. Matsumoto, S., Takashima, Y., "Atomization Characteristics of Power Law Fluids by Rotating Disk", ICLAS-78, pp.145-150, 1978.

참고문헌

1. Pfeifer, T., Eversheim, W., Keonig, W., "Manufacturing Excellence", 1994.