

선삭에서 절삭유 입자 발생 예측모델

박성호*, 오명석**, 고태조#, 김희솔***

Prediction Model of Aerosol Generation for Cutting Fluid in Turning

Sung Ho Park*, Myoung Seok Oh**, Tae Jo Ko# and Hee Sool Kim***

ABSTRACT

This paper presents a prediction model for the aerosol generation of cutting fluid in turning process. Experimental studies have been carried out in order to identify the characteristics of aerosol generation in non-cutting and cutting cases. The indices of aerosol generation was mass concentration comparable to number generation, which is generally used for environment criterion. Based on the experimental data, empirical model for predicting aerosol mass concentration of cutting fluid could be obtained by a statistical analysis. This relation shows good agreement with experimental data.

Key Words : Aerosol(입자), Spin-off(분리), Splash(분산), Mass Concentration(질량농도), Regression Analysis(회귀분석), Turning(선삭)

1. 서론

환경을 고려한 제작 방법을 Green Manufacturing 이라고 하며, 이를 위해서 이미 선진국에서는 21세기의 환경산업에 부응하고 ISO14000의 규제 충족 및 Green Round에 대비하여 많은 노력을 기울이고 있다.^{1,2} 절삭가공분야에 있어서도 예외는 아니어서 환경친화적인 절삭을 위해 많은 연구가 진행되고 있다.^{3,4}

절삭가공에 있어서 환경에 영향을 미친다고 하는 절삭유는 냉각, 윤활, 칩 배출을 촉진하는 등의 유용한 기능을 갖는다. 그러나 절삭유는 인체에 유해한 발암성, 독성, 피부염 및 인화성 등과 관련하여 인체에 유해할 뿐 아니라 대기오염과 수질오염을 유발시키는 요인이 될 수 있다.⁵ 따라서 절삭유

를 사용하지 않는 환경친화적 건식 절삭공법의 개발은 중요하다. 이런 관점에서 미국 OSHA (Occupational Safety and Health Administration)에서는 작업장에서 공기 중의 미립자 농도와 관련하여 허용노출한도를 $5mg/m^3$ 에서 $0.5mg/m^3$ 으로 낮출 것을 제안하였다.

절삭가공 중에 발생하는 미스트란 작업장내에서 장시간 부유할 수 있는 입경 $20\mu m$ 이하의 액체 입자로 구성된 에어로졸(aerosol)을 말한다. 통상 액 절삭유의 경우 $5\mu m$, 미스트 절삭유 공급의 경우 $1\mu m$ 크기의 입자가 작업장의 공기 중에 부유하게 된다. 이러한 의미에서 절삭유의 사용으로 인하여 작업장을 오염시키게 되는 절삭유의 미스트 생성과정을 연구하는 것은 중요하다. 따라서 절삭유의 생

접수일: 2003년 12월 19일; 게재승인일: 2004년 3월 12일

* 경일대학교 기계공학부

** 영남이공대학 기계과

교신저자: 영남대학교 기계공학부

E-mail: tjko@yu.ac.kr, Tel:(053)810-2576

*** 영남대학교 기계공학부

성 메커니즘에 관한 많은 연구가 진행되었는데, Yue 등은 미립화 형성기구에 바탕을 둔 절삭유 미스트 생성에 관한 기초 이론을 연구하였다. 즉, 절삭유가 회전하는 원형 평판 위의 표면에 충돌할 때 평면상에 형성되는 유막 두께와 유막의 파괴에 의한 물방울 줄기 (liquid ligament) 및 작은 물방울 (droplet)의 형성 모형을 고찰하고, 물방울의 직경 변화와 천이에 미치는 유량의 영향 등을 연구하였다.⁵ 또한, 선삭시 미스트의 질량을 최소화 할 수 있는 기초 연구를 수행하여 절삭속도가 미스트 질량과 입자의 크기에 밀접한 관계가 있다는 것을 밝혔다.⁶

기존의 절삭유 입자 발생에 대한 연구는 주로 비절삭시 발생하는 에어로졸 입자의 주요한 발생 기구인 분리기구에 국한되어 있었다.^{6,8} 그러나 실제의 절삭에서는 절삭공구의 계재로 절삭열의 발생, 칩 및 공구의 간섭현상이 발생하여 분리 메카니즘으로만 절삭유의 미립화 과정을 규명하기에는 무리가 따른다. 즉, 이상적인 상태의 조건에 상당하는 비절삭시의 이론이 절삭시에 그대로 적용되지 않는다. 물론 비절삭시에 대한 미스트 생성이론을 정립하여 봄으로서 절삭시의 미스트 발생에 미치는 제반 영향인자들의 선정과 실험 변수의 제어에 도움은 될 수 있다.

이상과 같은 문제점을 바탕으로 최근 절삭 가공시 발생하는 미스트 입자의 크기분포 및 수농도 (number concentration) 특성을 파악한 후 가공시 발생하는 입자는 분리 (spin-off) 뿐만 아니라 분산 (splash)의 영향이 매우 크다는 사실이 실험적으로 규명된 바 있다.^{9,10} 이러한 결과를 이용하여 환경영향지수 등 평가모형을 구축하기 위해서는 절삭시의 미스트 생성모형이 필요하다. 즉, 가공조건에 따른 미스트 입자의 발생을 예측할 수 있는 모형이 필수적으로 요구되고 있다.

이러한 미스트의 영향을 평가하는 기준으로서 입자의 크기, 수농도, 입자의 표면적 및 질량 농도 (mass concentration) 등이 관심항목으로 되고 있으나, 각종 산업안전 규격에서는 미립자 물질에 대한 건강위험 안전도의 척도로서 입자크기에 대한 질량농도의 평가가 가장 일반적인 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 질량 농도의 발생특성 및 이에 미치는 제반 절삭변수의 영향인자에 대하여 고찰하며, 이를 바탕으로 절삭가공시 발생하는 미스트의 질량농도 발생 예측모형을 제안하고자 한다.

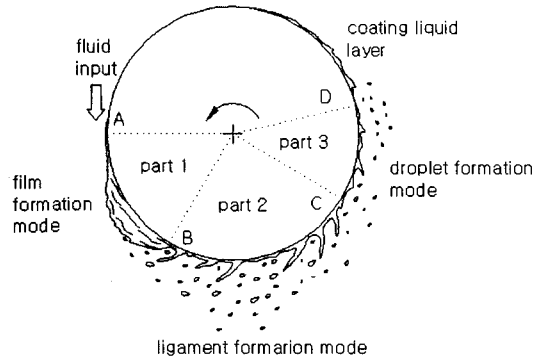


Fig. 1 Spin-off atomization process⁹

2. 미립자 발생 메카니즘 및 실험 장치

일반적으로 절삭유의 환경영향 평가지표로서는 작업 현장에서 부유하는 공기 중의 미립자 크기와 농도를 사용한다. 미립화과정은 Fig. 1과 같이 액막 또는 액체제트가 액체의 운동에너지, 고속의 공기 중에 노출, 회전 또는 진동하는 기구로부터 전달되는 기계적 에너지 등에 의해 분리되는 현상이다. 절삭유 사용으로 인한 에어로졸 입자의 연구는 Ljang, Yue 등이 액체 미립화 이론을 바탕으로 절삭유 미립자 발생 메카니즘에 근거하여 미립자 직경 및 발생율에 대한 모형을 제시하였지만, 이것은 실제 절삭을 하지 않은 이상적인 모형인 회전하는 원통 면을 따라 흐르는 액체 분리 메카니즘으로써 미립자의 농도와 크기를 설명하고자 하였다.^{5,6,11} 이것은 각각 분리, 분산, 증발 (evaporation) 메카니즘으로 이루어져 있으며, 각각의 모형에 대해 타당성을 실험적으로 증명하고자 하였다. 그러나 실제 절삭과정은 절삭공구와 칩으로부터 분산효과가 미스트 발생의 지배적인 원인임을 실험적으로 규명한 바 있다.⁹

따라서 실제 절삭과정에 대한 미스트의 발생 모형을 만들기 위해서 수평형 CNC선반(Pro6)을 이용하여 먼저 실험을 수행하였다. 발생된 입자의 측정에는 입자계수기(Aerosizer DSP 3220, TSI)를 이용하여 입자의 평균크기, 수농도 (particles/m³), 질량농도 (mg/m³)를 각각 측정하였다.^{9,10} 미스트 측정 프로브의 위치는 절삭유 공급노즐이나 절삭영역으로부터의 영향을 배제할 수 있고, 작업자가

선반 문을 열었을 때 작업자의 호흡기관과 거의 일치하는 위치인 공작물 중심에서 225mm 상부 및 작업자 쪽으로 26mm 읍셋 및 공작물 자유단에서 주축쪽으로 10mm인 위치에 설치하였다. 절삭유는 Soluble형 W2종1호(물:절삭유 혼합비=10:1), 공급 포트의 내경은 11mm(10l/min 및 20 l/min 공급시) 및 2mm(0.5l/min 공급시)인 노즐을 이용하였다. 또한, 본 실험 수행 시 배경입자의 영향을 최소화하기 위하여 선반 주위에 준 청정능력을 갖는 영역(4,400×3,900×1970mm)을 설치하여 항온 및 항습의 기능을 갖도록 하였다. 준 청정장치를 설치하기 전에 외부의 질량농도는 0.045 mg/m³(수농도 8.00E+07particle/m³) 이었으나 준 청정장치의 설치 후에는 입자의 질량농도는 0.002 mg/m³(수농도 1.0E+07particle/m³) 이하로 유지되었다. 또한 실내온도는 20℃로 유지하였고, 상대습도는 항상 60%를 유지하였다. 아울러 선반의 칩 커버 실내의 질량농도(평균치 0.006mg/m³, 수농도 1.514E+07 particle/m³)는 준 청정실의 실내 수농도 보다 항상 높아 이를 제어하고 실험의 원활한 진행을 위해 Mist Cleaner를 설치하였다.¹²

3. 실험결과

절삭가공 공정 중에 발생하는 절삭유 미스트 입자의 질량농도를 실험적으로 관찰하여 미스트 입자의 발생예측모델을 제안하기 위한 실험을 먼저 수행하였다. Fig. 2는 직경 60mm인 공작물(재질: SM45C)을 절삭속도 140m/min, 절삭깊이 1.5 mm, 이송속도 0.15mm/rev 및 절삭유량이 0.5 l/min인 조건으로 25초 동안 절삭 후 20초 동안 측정된 에어로졸 입자의 크기분포와 수농도 분포를 나타내는 측정결과의 한 예이다. 그림에서 가로축은 입자의 크기를 나타내며, 세로축은 각각의 크기에 대한 수농도를 나타낸다. 그림에서 나타나 있듯이 미립자는 1μm 이하와 이상의 것이 동시에 정규분포를 이루며 나타나는 2중 분포 형태를 나타내는데, 이러한 결과는 다른 문헌에서도 나타

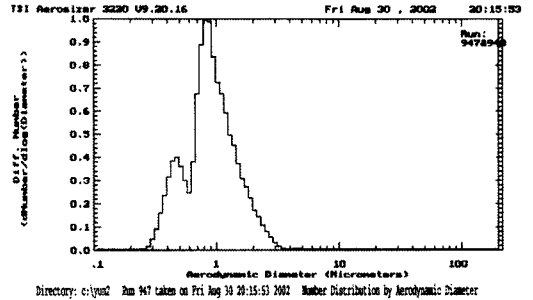
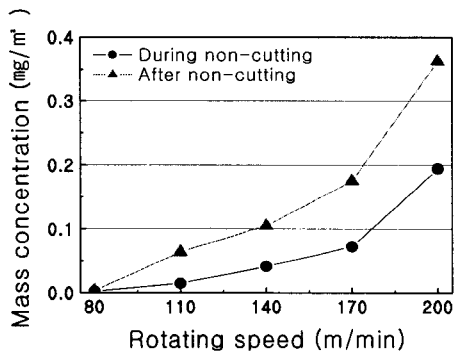


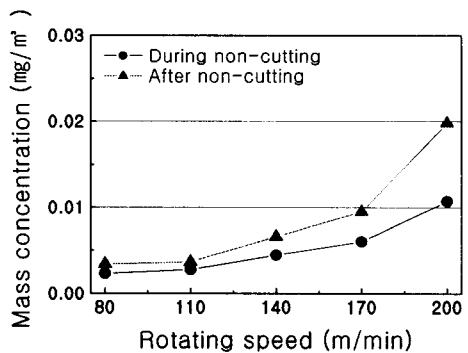
Fig. 2 Aerosol size distribution and concentration of Aerosizer

난다고 보고되어 있다.⁶ 이를 바탕으로 측정이 정상적으로 진행되고 있다고 판단하였다.

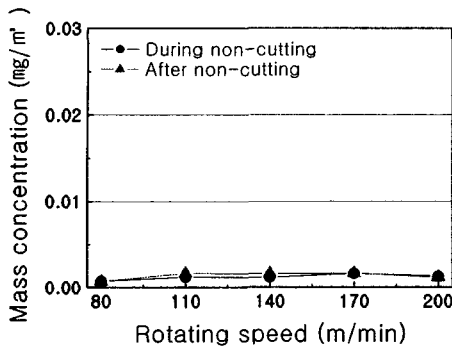
Fig. 3은 직경 40mm(D40)의 공작물을 공회전 시키면서 절삭유량(Q)을 각각 20, 10, 0.5 l/min으로 공급 중(비절삭 중이라고 명명함) 및 절삭유의 공급 정지 후(비절삭 후라고 명명함)에 대한



(a) Flow rate 20l/min



(b) Flow rate 10l/min



(c) Flow rate 0.5l/min

Fig. 3 Mass concentration during and after the supply of cutting fluid without cutting

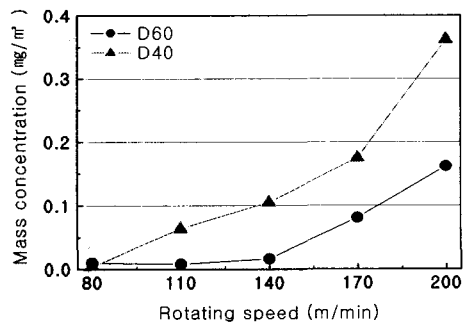
질량 농도의 발생 특성을 나타낸 것이다. 절삭유량이 많을수록 비절삭 중(25초간 절삭유 공급) 대비 비절삭 후(절삭유 공급 정지 후 20초 경과)의 질량 농도가 크게 생성되고 있음을 알 수 있으며, 공작물의 선속도(절삭속도)가 증가함에 따라서 질량 농도는 증대하였다. 그러나 절삭유량 0.5l/min 시에는 비절삭 중과 비절삭 후의 차이 및 선속도의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.

비 절삭시에 유량별 직경(D40, D60)과 회전속도에 따른 질량 농도의 변화 특성을 나타낸 것이 Fig. 4이다. 이 실험은 앞의 결과를 반영하여 절삭유 공급 후에 측정된 결과이다. 비 절삭시 발생하는 미스트 입자의 질량농도는 공급 절삭유량이 많을 경우(20l/min)에는 회전속도가 증가할수록 많이 발생한다. 그러나 공급유량이 적은 경우(10l/min, 0.5 l/min)에는 회전 속도에 따른 경향이 명확하게 나타나지 않는다. 20l/min의 절삭유량 공급 시에는 동일한 선속도(공작물 직경×회전수)에서도 공작물 직경에 따라서 질량 농도의 생성 특성이 다름을 알 수 있었다. 다르게 표현해서 동일한 절삭속도에서 직경의 차이에 따라서 질량농도의 생성량이 다름을 알 수 있고, 공작물의 직경이 큰 경우보다는 회전수가 높은 경우가 큰 영향을 미친다. 또한, 그 차이는 절삭유의 공급량에 따라서 달라짐을 알 수 있다. 이때 생성된 질량 농도의 최대치는 0.36mg/m³ 이었다. 10l/min 및 0.5l/min에서는 최대치가 각각 0.03mg/m³ 및 0.02mg/m³으로 나타났으며, 전 속

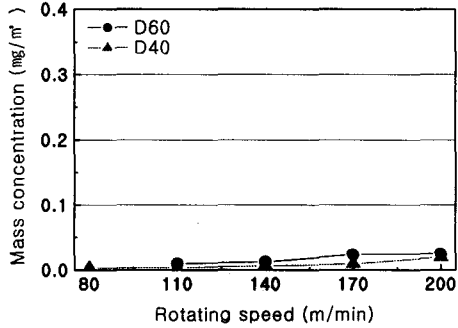
도 구간에 관계없이 질량 농도의 변화가 거의 없음을 그래프는 보여 주고 있다.

Fig. 5는 절삭유량이 각각 20, 10, 0.5l/min인 습식 절삭의 경우에 대해서 공작물 직경(D40, D60, D80)에 따른 질량 농도의 특성 변화를 절삭속도 별로 각각 나타낸 것이다. 어느 경우나 절삭 중에 비하여 절삭 후의 질량농도가 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 절삭 중인 경우에 비하여 절삭 후는 주어진 실험시간동안 발생된 미스트 입자가 누적되어 선반의 한정된 공간 내에서 단위체적당 미스트 입자의 농도가 높아졌다는 것을 의미한다. 또한 절삭시 절삭공구의 개입에 의해 분산이 가속화되고, 발생된 절삭열을 절삭유가 냉각시키는 과정에서 증발에 의하여 절삭유가 공간상에서 응축되기 때문에 질량농도가 절삭 중보다 절삭 후가 높게 나타난다. 비절삭시와 마찬가지로 절삭유량 20 l/min인 경우에는 동일 절삭속도(원주속도)에서 직경에 의한 영향보다는 회전수의 영향을 많이 받았음을 알 수 있다. 동일한 절삭속도에 대하여 가공 후에는 직경이 작을수록, 즉 회전수가 높을수록 발생하는 질량농도가 증가하나, 절삭중인 경우에도 동일한 경향을 보이지만 뚜렷하지는 않다. 따라서 이후의 실험은 미스트 발생량을 보다 많이 주는 절삭 후의 실험결과를 사용한다.

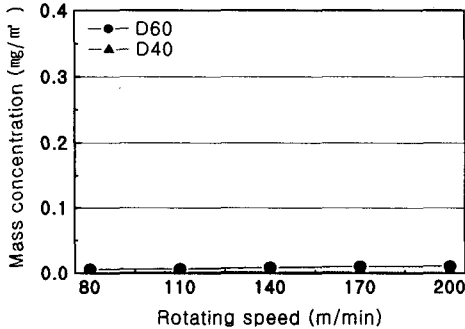
Fig. 6은 동일한 절삭유량에 대하여 공작물 직경과 절삭속도의 변화에 따른 질량 농도의 특성 변화를 나타낸 것이다. 절삭 유량별 직경의 변화에 따른 질량 농도의 생성 특성은 직경이 작을수록 약간 높은 것으로 보이기도 하지만 이는 직경이 작을수록 동일 절삭속도에서 회전수가 빨라짐에 의한 것으로 판단된다. 이를 설명하기 위하여 위의 결과



(a) Flowing rate 20l/min



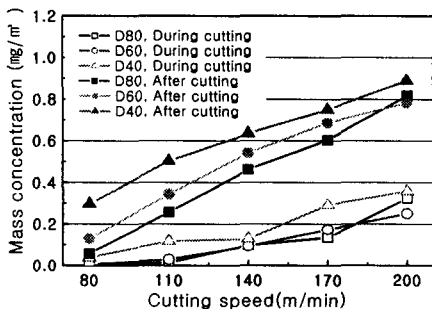
(b) Flow rate 10l/min



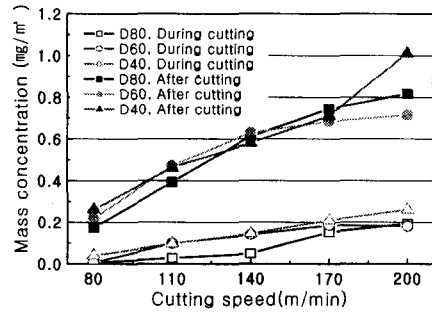
(c) Flow rate 0.5l/min

Fig. 4 Mass concentration according to workpiece diameter without cutting

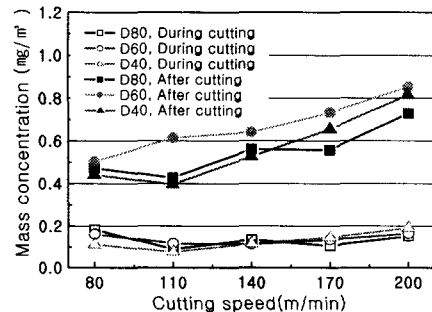
를 회전수 기준으로 나타낸 그림이 Fig. 7이다. 그림으로부터 동일한 회전수에 대해 직경이 클수록 질량농도가 증대함을 알 수 있다. 이는 직경이 크



(a) Flow rate 20l/min



(b) Flow rate 10l/min



(c) Flow rate 0.5l/min

Fig. 5 Mass concentration according to workpiece diameter in cutting

면 동일 회전수에서 원주속도가 빨라지므로 원심력이 증대하고 이로 인하여 회전 분리 기구에 의하여 미립자가 많이 발생되기 때문이다. 그림 내에는 각각의 직경에 대한 fitting curve를 회전수에 대해 나타내었는데, 이를 바탕으로 질량농도 예측모델을 만들 수 있을 것으로 판단하였다.

4. 질량농도 예측모델

질량농도 예측모델을 만들기 위해서 본 연구에서는 회귀분석법을 이용하였다. 회귀분석을 행하기 위하여 유량에 대한 질량농도의 산점도(scatter plot)를 구해본 결과 건식절삭인 경우를 제외하고는 특이한 점이 없었다. 따라서 건식인 경우는 본 모델에서 제외하고 절삭유를 사용하는 경우에 대해서만 모델을 세웠다. 다음으로 절삭유량 10 l/min에 대하여 산점도의 데이터가 어느 방정식

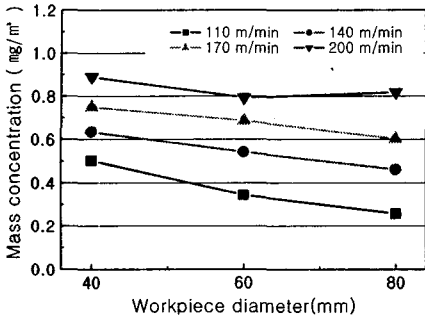


Fig. 6 Mass concentration according to workpiece diameter in cutting at flow rate of 0.5 l/min

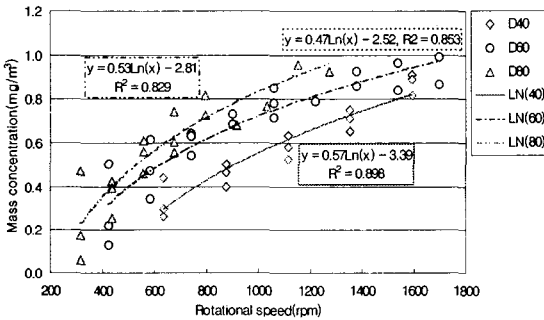


Fig. 7 Mass concentration according to rotational speed in cutting

에 잘 맞는가를 적합도 분석을 하였는데, 유량이 10l/min인 경우에 대수방정식 모델을 사용하게 되면 회귀계수(R^2)가 0.976으로 나타났다. 따라서 이 경우는 대수 모델을 사용한 선형 회귀 분석(linear regression analysis)이 가능함을 의미하는 것이다. 모형의 타당성, 회귀계수, 오차의 독립성 검증으로부터 분석결과가 신뢰성이 있음을 입증하였다.¹² 일반적인 대수회귀방정식은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$m = \beta_0 + \beta_1 \ln(V) + \epsilon = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \quad (1)$$

여기서, m 은 질량농도, V 는 절삭속도, X 는 $\ln(V)$, β_0 및 β_1 은 추정회귀계수, ϵ 은 오차를 나

타낸다. 분석된 회귀계수를 이용하여 각각의 절삭 유량 10, 20, 0.5l/min 공급조건에 대한 질량농도 예측식을 구성하면 아래의 식 (2)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \widehat{m}_{10} &= -2.730 + 0.674 \ln(V) \\ \widehat{m}_{20} &= -2.742 + 0.664 \ln(V) \\ \widehat{m}_{0.5} &= -1.397 + 0.400 \ln(V) \end{aligned} \quad (2)$$

상기의 식은 절삭유량을 포함하고 있지 않으므로 절삭유량을 포함하는 예측 모델을 만들기 위해 우변의 상수 값에 대하여 각각의 유량별 회귀 계수에 대한 곡선 적합, 즉 β fitting을 행하면 아래와 같은 2차 방정식이 가장 적합한 것으로 나타났다.

$$\beta_{iQ} = \beta_0 + \beta_1 Q + \beta_2 Q^2 \quad (3)$$

단, 하첨자 i 는 0, 1로서 식 (2)의 우변의 첫째 및 둘째 항의 상수를 각각 나타낸다. 상기 식에 대한 회귀계수를 구하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

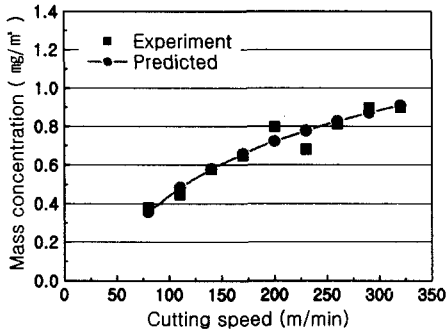
$$\begin{aligned} \beta_{0Q} &= -1.2912 - 0.2152Q + 0.0071Q^2 \\ \beta_{1Q} &= 0.3779 + 0.0449Q - 0.0015Q^2 \end{aligned} \quad (4)$$

상기 식 (4)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

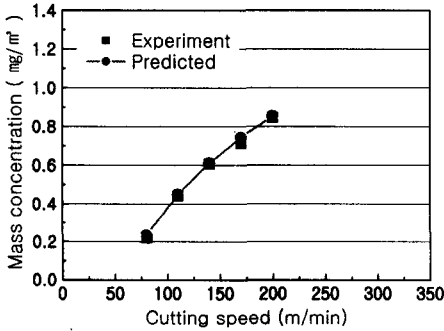
$$\begin{aligned} \widehat{m} &= -1.2912 - 0.2152Q + 0.0071Q^2 + \\ &+ (0.3779 + 0.0449Q - 0.0015Q^2) \ln(V) \end{aligned} \quad (5)$$

상기의 식 (5)는 미스트의 질량 농도를 예측하는 회귀방정식이 되며 절삭속도와 유량을 독립변수로 하고 있다. 즉, 절삭 가공시 공급되는 절삭유의 유량과 절삭속도의 독립변수에 따라서 발생될 수 있는 미스트의 질량 농도를 예측할 수 있는 모델이 되는 것이다.

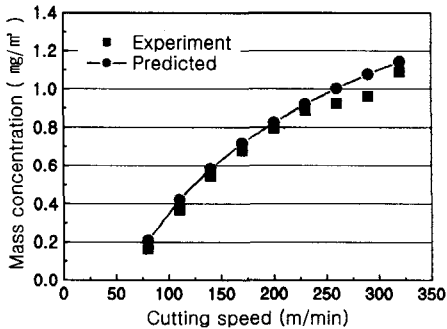
미스트의 질량농도 예측 모델인 식 (5)가 실측 질량농도를 얼마만큼 잘 반영하고 있는가를 검증한 것이 Fig. 8이다. 그럼으로부터 절삭유량별 절삭속도별로 비교적 예측값이 실측치와 잘 맞고 있음을 알 수 있다.



(a) Flow rate of 0.5 l/min



(b) Flow rate of 10 l/min



(c) Flow rate of 20 l/min

Fig. 8 Verification of estimation model of mass concentration of mist

5. 결론

본 연구에서는 절삭과정 중에 발생하는 미스트 발생을 질량농도 기준으로 평가를 하고, 이를 예측

하기 위한 모델을 세웠다. 회귀분석에 의한 모델은 절삭가공시에 유량과 절삭속도를 독립변수로 대수함수로서 만들었으며, 실험결과 예측값은 실측값과 잘 일치함을 보였다. 그 결과 본 연구에서 제안하는 모델은 추후 환경영향평가모델 등의 적용에 있어서 미스트의 질량농도 정보를 필요로 할 때 적용할 수 있을 것으로 본다. 물론 공작물의 재질과 사용하는 공구에 따라서 절삭 칩의 흐름방향과 칩의 모양이 달라지며, 따라서 본 모델의 정밀도는 떨어질 것으로 보인다. 이것은 추후의 연구과제로 진행될 예정이다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구 지원사업(1999-2-304-003-3)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Olson, W. W., "Environmental conscious manufacturing project contingency planning," Proceedings of ASME MED-Vol.8, pp. 421-427, 1998.
2. "Green manufacturing and the global materials industry," Advanced Materials & Processes, pp. 25-27, 1997.
3. Koelsch, J. R., "Lubricity vs the environment cascades of cleanliness," Manufacturing Engineering, pp. 50-58, May 1997.
4. Aronson, R. B., "Why drying machining," Manufacturing Engineering, pp. 33-36, Jan 1995.
5. Yue, Y., Sutherland, J. W., Olson, W. W., "Cutting fluid mist formation in machining via atomization mechanisms," ASME Design for Manufacturing and Assembly, DE-Vol. 89, pp.37-46, 1996.
6. Yue, Y., Gunter, K. L., Michalek, D. J., Sutherland, J. W., "An examination of cutting fluid mist formation in turning," Transaction of NAMRI /SME Vol. X X VII, pp.221-226, 1999.
7. Hwang, J., Chung, E. S., "optimization of cutting fluids for environmentally conscious machining," Proceeding of KSPE Spring Annual Meeting, pp. 948-951, 2000.

8. Hwang, J., Chung, E. S., "A Study on the environmentally conscious machining technology: cutting fluid atomization and environmental impact through spin-off mechanism in turning operation(1)," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 3, pp. 73-79, 2002.
9. Ko, T. J., Park, S. H., Kim, H. S., "Experimental verification of the mist generation mechanism in turning," Int' Machine Tools & Manufacture Vol. 43, pp.115-120, 2003.
10. Ko, T. J., Oh, M. S., Park, S. H., Kim, H. S., "Experimental verification of aerosol generation mechanism for cutting fluid in turning," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 12, pp. 93-99, 2002.
11. Chen, Z., Wong, K., Li, W., Liang, S. Y., Stepenson, D. A., "Cutting fluid aerosol generation due to spin-off in turning operation : Analysis for environmentally conscious machining," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 123, pp. 506-512, 2001.
12. Oh, M. S., "Mist generation model of cutting fluid and its application to health hazard evaluation model in turning," Ph. D. Thesis, Yeungnam University, 2003.