

환경친화적 기계가공을 위한 기계적·열적측면에서의 절삭유제 사용효과에 관한 연구

모용구*, 황 준**, 정의식***

A Study on the Cutting Fluid Effectiveness in Mechanical and Thermal Terms Simultaneously for Environmentally Conscious Machining

Yong Goo Mo*, Joon Hwang**, and Eui Sik Chung***

ABSTRACT

This paper presents a methodology to analyze the cutting fluid effectiveness in mechanical and thermal terms simultaneously using finite element method and experimental work. Cutting fluid plays many roles in metal cutting process. Mechanically-thermally coupled effectiveness of cutting fluids affect to friction coefficient at tool-workpiece interface and cutting temperature and chip control, surface finish, tool wear and form accuracy. Through this study, it can be explained that the critical behavior of cutting fluids will be able to apply optimal environmentally conscious machining process.

Key Words : Cutting Fluid(절삭유제), Cutting Temperature(절삭온도), Finite Element Method(유한요소법), Environmentally Conscious Machining(환경친화적 기계가공)

1. 서론

기계가공을 통해 생산되는 제품의 품질향상을 위해서는 절삭유제의 사용이 불가피하다. 그 이유로 절삭유제는 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 원가절감이 가능하게 하는 역할을 하고 있다⁽¹⁾.

최근 환경과 건강에 대한 관심이 고조되면서, 생산기술의 측면에서도 친환경성을 고려한 제조프

로세스의 개선 또는 개발이 요구되고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위한 다각도의 연구가 선진국을 중심으로 활발히 전개되고 있는 실정이다⁽²⁾.

'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 안되는 이율배반적인 성격을 갖는 사안이기도 하다.

본 연구에서는 생산기술의 기본 목표를 유지 하면서 또한, 동시에 기존의 생산·제조 시스템을

* 대전산업대학교 산업대학원 기계설계공학과
** 충주대학교 기계설계학과
*** 대전산업대학교 기계설계공학과

이용한 환경친화적이고 최적화된 프로세스의 개선 방안을 찾는데 그 기본 방향을 두고 있다.

이러한 문제의 효과적인 해결을 위해서는 먼저, 공작기계-공구-공작물로 구성된 절삭가공계에 있어서 절삭유제의 사용이 절삭가공특성, 즉 기계적 및 열적특성 측면에 대한 이론 및 실험적 방법을 통해 그 효과가 절삭기구에 미치는 영향을 보다 정확하게 검토하는 것이 중요하며, 이러한 과정을 통해 정립된 지식들은 향후, 환경친화적 제조프로세스 개발에 중요한 기초가 될 것이다.

절삭유제의 사용은 오랜동안 현장경험에 의존하여 왔으며, 그 효과나 특성이 정량적으로 계량화되지 못한 것이 현실이다. 특히, 최근에 들어서 환경에 관련된 관심이 증대되면서 절삭유제 사용을 통해 얻을 수 있는 제품가공정밀도의 향상, 공구수명 증대를 통한 원가절감, 칩처리성 등의 장점은 접어둔 채, 폐유처리 등을 이유로 특별한 대책없이 절삭유의 사용을 무작정 줄이려는 경향이 늘고 있다. 또한, 그간의 연구에서는 주로 건식절삭을 대상으로 절삭현상을 이해하는데 노력하였으며, 이로 인해 상대적으로 절삭유가 절삭기구에 미치는 영향을 심도있게 다루지 못한 점도 없지 않다.

'환경친화적 제조프로세스'의 개선 및 개발을 위해서는 생산성과 환경친화성의 양면성을 모두 충족할 수 있는 개념의 연구가 수행되어야 하며, 본 연구에서 다루고자 하는 부분 역시도 절삭유제가 갖는 장점과 특징을 최적화하기 위한 기초자료를 확보하는데 있다.

본 연구에서는 절삭유제의 사용이 절삭현상에 미치는 영향과 그 특성을 해석적·실험적 방법을 적용해 그 기여도를 정량적으로 분석하여 향후 최적화된 절삭유 제어를 위한 기초자료로 삼고자 크게 두가지 특성, 즉 기계적(윤활작용에 의한 마찰계수의 변화)·열적(냉각작용에 의한 절삭온도의 변화) 측면에서 보다 심도있게 그 특성을 고찰하고자 한다.

2. 유한요소모델링 및 실험장치 구성

2.1 절삭기구의 유한요소 모델링

열전대를 이용한 공구상의 절삭온도 측정을 위해서는 공구내부의 적절한 위치에 열전대를 삽입하여야 하는데 이때, 공구의 강성 약화와 마모 촉진 등이 야기될 수 있다. 또한, 공구재질은 열전달 구

배가 큰만큼 온도측정점이 공구표면으로부터 멀리 떨어질 경우 측정된 절삭온도값이 부정확하게 될 수 있으므로 이러한 현상들을 고려하여 적절한 열전대의 삽입위치의 설정이 중요하다. 따라서 절삭기구의 유한요소해석을 통해 공구상의 절삭온도분포 및 온도구배를 예측함으로써 적절한 열전대 삽입위치를 결정하고자 한다.

절삭가공중 절삭유제가 투입되면, 공구-공작물-칩상을 유동하며, 절삭유제 고유의 비열과 열전달계수로 인해 절삭열을 제거하는 냉각작용과 각 마찰접촉 부위에 투입되어 윤활작용을 함으로써 마찰열의 감소와 표면품위를 개선하는 효과는 널리 알려져 있다. 그러나, 구체적인 열전달 거동이 밝혀져 있지 못하고, 최적화된 절삭유의 사용을 위해서는 이에 대한 연구가 보다 활발히 진행되어야 할 것으로 판단된다.

절삭유제가 절삭온도를 낮추는 현상은 절삭가공중에 공구-칩, 공구-공작물 사이의 틈새를 통해 절삭유가 공급되므로써 대류에 의한 열전달을 촉진시킨다는 의미로 해석할 수 있으며, 이를 통해 제1, 2변형역에서 발생한 절삭열이 공구로 전달되므로써 야기되는 절삭온도 상승을 방지하는 것이다. 따라서 절삭가공중 절삭유의 열전달계수(heat transfer coefficient)를 구하기 위하여 공구-공작물-칩으로 구성된 절삭영역에서의 열전달은 2차원 x-y 평면상에서 다음식과 같은 열적평형을 이루고 있다.

$$c\rho_w v_s \frac{\partial T}{\partial x} - k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] - \dot{G} = 0 \quad (1)$$

여기서, c 는 공작물의 비열, ρ_w 는 공작물의 밀도, k 는 열전도계수, v_s 는 절삭속도, T 는 온도이다. 또한 \dot{G} 는 비열발생률로서,

$$\dot{G} = \frac{1}{V} \int_V \dot{\sigma} \epsilon_p dV + \sigma_f V_f \quad (2)$$

여기서, 첫째항은 1차변형역에서의 소성전단변형에, 둘째항은 공구와 칩간의 마찰에 관계된다. 또한 열전달계수 h 는 다음식으로부터 구할 수 있다.

$$h[T_m - T_w] = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

유한요소법을 이용한 절삭시뮬레이션에 있어서 공구의 진행에 따라 공작물로부터 칩이 분리되

$$\mu = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha} \quad (5)$$

여기서, F_c 는 주분력성분을, F_t 는 배분력성분을 의미하며, α 는 공구경사각이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유한요소해석

절삭기구의 유한요소해석 결과 얻어진 절삭온도 분포를 Fig.3과 Fig.4에 나타내었다. 절삭온도는 공작물의 전단소성변형과 공구-칩간의 마찰에 기인하여 발생하고 있으며, 발생된 열은 칩과 함께 배출되거나, 혹은 공구로 전달되어 공구내부의 온도 상승을 야기시키고 있음을 알 수 있다.

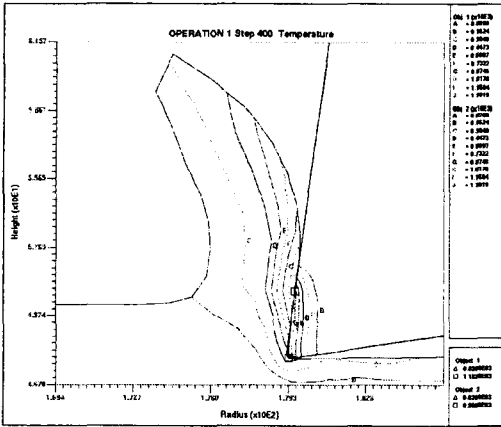


Fig. 3 Contours of estimated cutting temperature under dry cutting condition

또한, 공구에서의 온도분포도 공구날끝으로부터 경사면을 따라 조금 떨어진 위치에서 최대온도 점이 형성되고 있는데, 이는 제1, 2차변형역에서 발생된 절삭열이 중첩되는 지점과 일치하고 있기 때문이다. 따라서, 절삭온도 측정을 위한 열전대의 삽입은 최대온도점 위치 바로 아래에 미소드릴링을 실시하고, 열전대용 전용 접착제를 이용하여 열손실이 없도록 설치하였다.

건식절삭, 즉 절삭유제를 통한 열전달 없이 공구와 공작물 사이에 전도열전달의 효과만이 나타나는 경우(Fig.3)와 공구-공작물-칩사이에 절삭유의 투입으로 인한 냉각효과와 윤활효과를 통한 마찰계

수감소를 고려한 습식절삭모델(Fig.4)을 비교해보면, 먼저 절삭온도의 감소효과는 절삭유의 대류열 전달 효과에 기인함을 쉽게 알 수 있으며, 칩의 형상도 마찰계수의 감소로 인해 칩의 배출이 원활해져 쉽게 말려지고(curling) 있음을 확인할 수 있다.

본 해석에서 얻어진 절삭온도분포를 바탕으로 절삭유의 기계적·열적 측면에서의 효과를 확인하기 위한 절삭실험을 실시하고, 그 결과를 고찰한다.

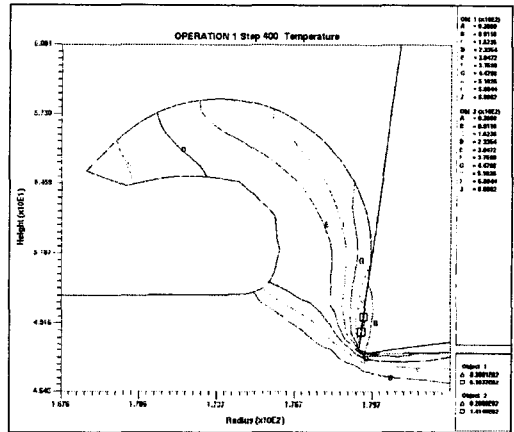


Fig. 4 Contours of estimated cutting temperature under wet cutting condition

3.2 절삭유제의 기계적 특성⁽⁷⁾

먼저, 절삭유제 사용에 따른 일반적인 절삭특성을 알아보기 위하여, 주축회전속도 135rpm, 고속도 공구장을 이용하여 건식절삭(Fig. 5)과 습식절삭(2.65 l/min의 솔루블형 절삭유 사용, Fig. 6) 조건하에서 수행된 절삭가공시 열전대와 공구동력계를 이용하여 측정된 절삭온도와 절삭력을 각각 비교하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 건식절삭인 경우 공구에 삽입된 열전대에서 측정된 절삭온도는 절삭개시 80초 경과시 130℃를 나타내고 있으며, 이 온도는 절삭시간의 증가와 함께 상승하는 경향을 보이는 반면, 절삭유제를 사용한 습식절삭에서는 절삭온도가 35℃ 이하로 절삭초기에 열적평형상태를 이루며 감소, 유지되는 절삭열 냉각효과를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

또한, 절삭저항의 변화도 절삭유제의 사용전과 비교하여 사용후에는 공구와 공작물간의 윤활작용 증가로 인해 마찰계수의 감소를 야기시키며, 이로 인해 칩의 원활한 배출은 절삭력의 감소로 이어지

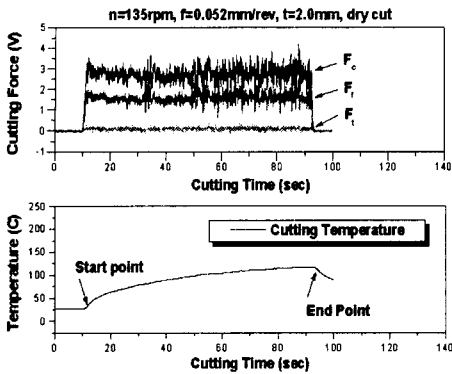


Fig. 5 Variation of measured cutting force and cutting temperature under dry cutting condition with high speed steel tool

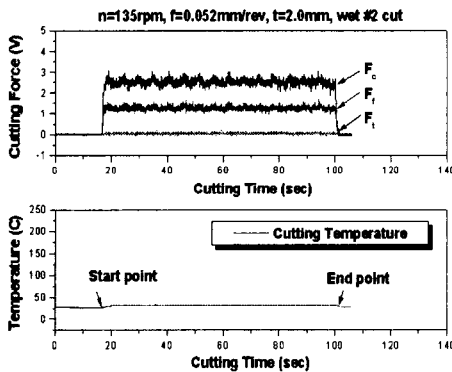


Fig. 6 Variation of measured cutting force and cutting temperature under wet cutting condition with high speed steel tool

고 있음을 알 수 있다.

절삭유제 사용이 절삭가공의 기계적특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 측정된 절삭력성분으로부터 식(5)를 이용하여 평균마찰계수를 계산하고, 그 결과를 고찰하였다.

Figure 7과 Fig. 8 에는 절삭유제량 변화에 따른 고속도공구강과 초경공구를 사용한 실험에서 얻어진 절삭력을 이용하여 계산한 평균마찰계수값을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭유량이 증가할수록 평균마찰계수는 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 또한 절삭속도가 증가할수록

마찰계수의 감소폭은 크게 증가하는 경향을 나타내고 있다.

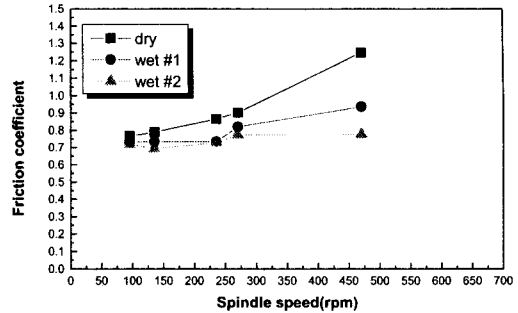


Fig. 7 Variation of friction coefficient at tool-workpiece interface using high speed steel tool

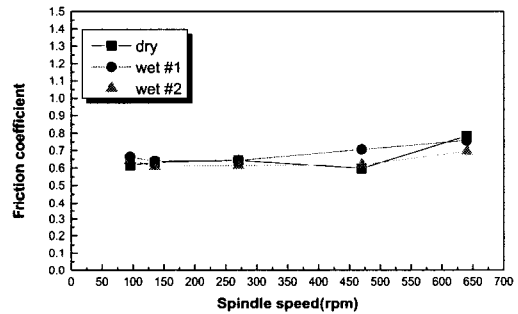


Fig. 8 Variation of friction coefficient at tool-workpiece interface using carbide insert

고속도공구강을 이용한 습식절삭실험에서 건식절삭보다 습식절삭 wet #2 조건인 경우 마찰계수가 약 38%이상 감소되는 결과를 나타내고 있으며, 초경공구를 이용한 습식절삭 결과에서는 최대 11%의 마찰계수 감소를 나타내고 있다. 이상의 결과를 비교해 볼 때, 절삭유제의 윤활작용에 의한 효과는 절삭가공시 공구-공작물 간의 기계적 접촉을 효과적으로 줄여주고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 공구마모 감소등의 효과로 나타난 것으로 판단된다.

실험결과에서 알 수 있듯이, 절삭조건, 공구재질등의 가공조건에 따라 절삭유제의 윤활효과를 극대화할 수 있는 최적의 절삭유제 선정과 절삭유량의 결정이 가능하리라 판단되며, 이는 과도한 절삭유 사용에 따른 환경영향을 최소화할 수 있을 것

로 생각된다.

3.3 절삭유제의 열적 특성^(6,7)

절삭가공은 매우 짧은 가공시간동안에 공구-공작물간의 접촉, 마찰, 소성변형, 전단변형과 같은 복합적인 변형거동을 갖고 있으며, 절삭가공에 소요되는 절삭에너지의 대부분이 열적·기계적 연성(thermal-mechanical coupling) 특성에 의해 절삭열로 변환되고 이는 공작기계-공구-공작물로 구성되어 있는 절삭가공시스템의 절삭온도 상승의 주 원인이 되며, 결국 가공정밀도의 악화는 물론, 시스템의 수명단축으로 이어진다.

본 연구에서는 절삭공구의 일정부위에 열전대를 삽입하고, 절삭온도의 변화를 측정하여 절삭유제의 사용에 따른 열적효과를 분석한다.

Figure 9와 Fig. 10 에는 고속도공구강과 초경공구를 사용하여 건절삭, 혹은 절삭유 사용량을 각각 wet #1(0.45 l/min), wet #2(2.65 l/min)으로 변화시키면서 절삭가공한 경우, 절삭속도 변화에 따른 공구상의 열전대로부터 절삭 개시 20초 후에 측정된 절삭온도 거동을 나타내었다.

실험결과에서 알 수 있는 바와 같이, 습식절삭의 경우 동일 절삭조건에서 최대절삭온도는 초경공구가 고속강공구에 비하여 비교적 높은 경향을 나타내고 있다 또한, 절삭온도는 절삭속도의 증가에 비례하여 증가하는 경향을 나타내는데 이는 공구-칩간의 접촉마찰영역에서 발생한 열이 공구쪽으로 확산되기 때문이다.

절삭유제의 사용량에 따른 절삭온도의 변화는 470rpm을 기준하여 볼 때, 건식절삭 대비 wet #1 조건에서는 절삭온도를 약 73% 이상, wet #2 조건에서는 약 83% 이상 감소시키는 효과를 가져오고 있다. 한편, 초경공구를 이용한 실험에서는 건식절삭 대비 습식절삭에서는 53%(wet #1)~67%(wet #2)의 절삭온도 감소를 나타내고 있다.

이와같이, 절삭유제의 사용은 고유의 냉각효과에 의하여 절삭온도를 효과적으로 감소시킬 수 있으며, 특히 공구와 칩, 공구와 공작물간의 접촉영역에 투입되어 마찰계수의 감소와 마찰열의 공구확산을 적극적으로 방지하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 절삭유제의 기계적·열적 연성효과를 통해 가공정밀도의 향상, 공구마모 감소 등의 직·간접적인 생산성 증대효과를 꾀할 수 있는 것이다.

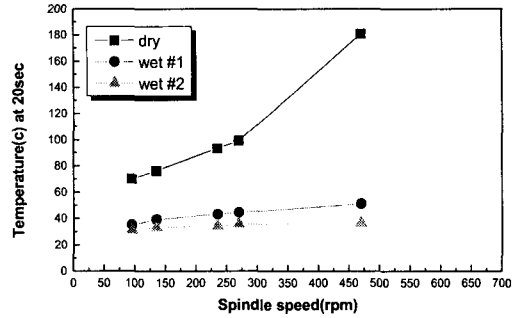


Fig. 9 Variation of measured cutting temperature under using high speed steel tool

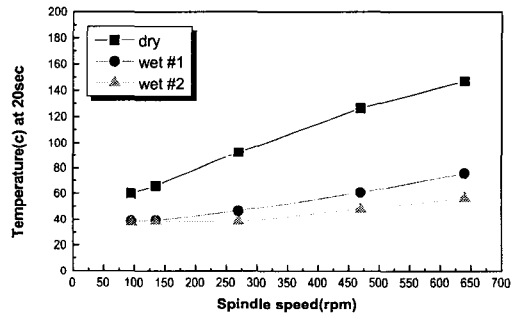


Fig. 10 Variation of measured cutting temperature using carbide insert tool

3.4 절삭유제의 칩처리성 효과

Photo. 1 에는 절삭속도와 절삭유제 적용에 따른 칩형상 변화 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭속도의 증가에 따라 칩의 색상은 은회색에서 균청색으로 변화하고 있음을 알 수 있으며, 이는 절삭가공중 칩에 전달된 절삭열의 증가에 따른 온도상승에 기인하였음을 의미한다. 또한, 건식절삭 대비 습식절삭(2.65 l/min) 조건에서는 절삭유제의 사용에 따라 칩의 곡률반지름이 감소하고 있어 칩처리성이 향상됨을 확인할 수 있으며, 이는 공구와 공작물간의 마찰계수의 감소에 따라 칩에 가해지는 응력이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

특히, (c),(d)의 경우를 비교해 보면, 건식절삭에서는 ribbon형 연속칩이 배출되어 공구나 공작물에 감겨 공구파손, 2차적인 가공표면 악화가 우려되나,

습식절삭에서는 칩브레이커 미장착 공구를 사용했음에도 불구하고 칩처리성이 매우 향상되었음을 확인할 수 있다.

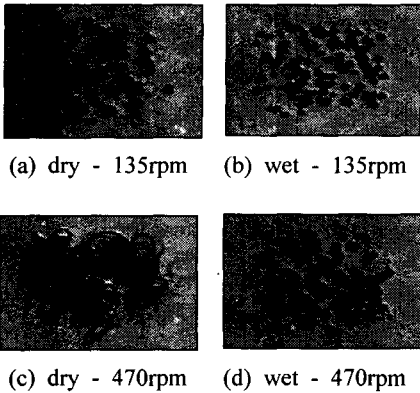


Photo. 1 Comparison of chip formation under dry & wet cutting condition using carbide insert

이와같이, 절삭유제의 사용이 칩형성에 미치는 절삭유의 윤활 및 냉각효과는 실험중에 얻어진 칩의 경도측정 결과에서도 확인할 수 있다.

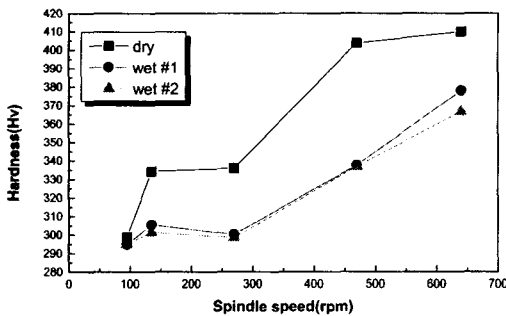


Fig. 11 Hardness variation of chip with respect to cutting speed under dry and wet cutting condition

미소경도계(micro-vickers)를 사용하여 50g 하중하에서 3개의 추출된 칩의 경도값을 측정하고 그 평균치를 Fig. 11에 나타내었다. 전반적으로 칩의 경도는 절삭속도의 증가에 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 절삭유제를 사용한 습식절삭의 결과가 건식절삭과 비교하여 경도값이 크게 작아지고 있음을 알 수 있다. 이는 곧 절삭유제의 사

용으로 인해 칩 생성이 용이하게 되어 칩처리성이 향상됨을 의미한다.

또한, 절삭유제량이 약 6배 정도 차이가 있는 wet #1조건(0.45 l/min) 과 wet #2조건(2.65 l/min)의 결과 비교를 통해 알 수 있듯이, 절삭유제의 전체사용량은 줄이면서도 생산성에 미치는 효과는 극대화 시킬 수 있는 최적의 절삭유제량이 정량적으로 존재할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

절삭유제 사용에 따른 절삭가공의 기계적·열적특성 특성을 고찰하기 위하여 공구동력계를 이용한 절삭력 측정과 열전대를 사용한 절삭온도 측정을 동시에 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 절삭유제 사용에 따른 기계적 특성을 대표하는 평균마찰계수는 절삭속도의 증가에 비례하는 경향을 나타내고 있으며, 건식절삭과 비교하여 2.65 l/min의 절삭유를 사용한 습식절삭에서는 마찰계수를 최대 38% 이상 감소시키는 윤활효과를 얻을 수 있었다.
- 2) 또한, 열적특성을 대표하는 절삭온도는 절삭속도의 증가에 비례하는 경향을 나타내며, 본 실험조건을 기준하여 최대 83% 이상 절삭온도를 감소시키는 절삭유제의 냉각효과를 얻을 수 있었다.
- 3) 절삭유제 사용에 따른 칩처리성 측면에서도 건식절삭과 비교하여 습식절삭의 경우가 절삭유제의 윤활효과와 부가적인 영향으로 인해 칩의 곡률반경이 현저히 감소하고 이로 인해 칩처리성이 매우 향상됨을 확인하였다.

이상의 연구결과를 통해 절삭유제의 기계적·열적 연성효과를 통해 절삭온도 감소에 의한 가공정밀도 향상, 공구마멸 감소, 칩처리성 향상 등의 직·간접적인 생산성 증대 및 가공신뢰성 향상을 꾀할 수 있음을 보다 정량적으로 검토할 수 있었다. 또한, 현재 현장에서 과도하게 사용되고 있는 절삭유제량의 제어와 절삭유제 공급방식의 개선을 통해 생산성 및 환경친화성을 극대화 시킬 수 있는 노력이 필요하며, 향후, 본 연구결과들은 가공요구조건을 최적화 할 수 있는 절삭유제 사용 방안을

제시하는데 활용하고자 한다.

후기

본 논문은 1998년도 대전산업대학교 교내학술 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Child, T.H.C., Maekawa, K., and Maulik, P., "Effects of Coolant on Temperature Distribution in Metal Machining," *Material Science Technology*, Vol. 4, No. 11, pp. 1006-1019, 1988.
2. Sheng, P., Bennet, S., and Thurwachter, S., "Environmental-Based Systems Planning for Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 47, 1, pp. 409-414, 1998.
3. Strenkoski, J. S., Carroll III, J. T., "A Finite Element Model of Orthogonal Metal Cutting," *ASME J. of Engr. for Ind.*, Vol. 107, pp. 346-354, 1985.
4. Cockcroft, M. G., Latham, D. J., "A Simple Criterion of Fracture for Ductile Metals," *J. of Inst. Metals.*, Vol. 96, pp. 33-39, 1968.
5. Boothroyd, G., "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools," McGraw-Hill, 1975.
6. Hwang, J., Chung, E. S., Mo, Y. G., "A Study on the Cutting Temperature Estimation Considering Heat Transfer Effects of Cutting Fluids," *KSPE Spring Conference*, Vol. 2, pp. 1057-1060, 1999.
7. Mo, Y. G., Hwang, J., Chung, E. S., "A Study on the Mechanical and Thermal Characteristics of Cutting Fluids in Machining Process," *KSPE Autumn Conference*, Vol. 2, pp. 1161-1164, 1999.