

윤	활	연	구
---	---	---	---

# 극미량윤활 절삭가공유제의 연구동향



한국화학연구원  
정근우 박사

## 1. 서론

20세기 후반에 들어 냉매에 의한 오존층 파괴를 막기 위해 대체냉매 사용을 의무화하고 이산화탄소 배출에 의한 지구 온난화를 방지하기 위해 탄소세를 도입하여 이산화탄소 배출을 억제한다든지 하는 지구차원의 환경보호 운동이 활발히 추진되고 있으며 환경보호를 위해 각종 규제조치가 강화되고 있는 실정이다.

윤활유 분야에서는 환경보호 차원의 생분해성 윤활유 사용이 아직 일반화되어 있지 않으나 독일이나 스위스, 스웨덴 등 일부 유럽국가나 호주 등에서는 모터보트나 철도레일용 그리스 등 특수용도에 생분해성 윤활제의 사용을 법적으로 의무화하고 있어 전 세계적으로 멀지 않은 장래에 일반화될 것으로 예상된다.

이러한 생분해성 윤활유의 새로운 적용분야 중 하나로 금속가공분야 특히 절삭가

공분야가 있다. 기존의 절삭유제는 주로 에멀전 타입의 수계 절삭유제로 대량사용에 의한 작업환경의 오염, 사용 후 폐액에 의한 환경오염, 산업폐기물로 처리할 때 발생할 수 있는 2차 오염 등 여러 가지 문제가 제기되고 있다. 또 절삭유제의 구성성분이 환경에 미치는 영향을 고려하여 원료로 사용하는 화학물질의 종류나 양을 대폭적으로 제한하려는 움직임도 있다. 즉, 기존의 절삭유제는 염소계 극압첨가제를 함유하는 것이 많았으나 이러한 염소계 화합물을 함유한 유제 폐액을 소각 처리할 때 다이옥신류의 발암물질이 발생할 가능성이 높다. 따라서 최근 일본에서는 2000년에 개정된 일본공업규격 JIS K 2241-2000에서 염소 또는 염소계 극압첨가제에 관한 기술을 삭제하여 염소화합물의 사용을 금지하였다.<sup>1)</sup>

이와 같은 배경에서 절삭유제를 전혀 사용하지 않는 dry절삭공법, 또는 절삭유제의 사용량을 최소화하는 semi-dry절삭공법에

대한 연구개발이 독일이나 일본, 미국 등에 서 큰 관심을 갖고 진행 중에 있다.<sup>2,3)</sup>

절삭유제를 사용하지 않는 dry절삭가공의 경우 폐액이 전혀 발생하지 않기 때문에 환경보호라는 측면에서는 매우 효과적이지만 현실적으로 생산효율이나 가공정밀도 등이 저하되는 문제가 있다.

한편 대표적인 semi-dry가공방법인 극미량윤활 (Minimal Quantity Lubrication : MQL)에 의한 가공은 극미량의 유제를 압축공기로 분무화시켜 절삭부위에 직접 분사함으로써 폐액을 최소한으로 줄이면서 공구의 마모를 저감시키고 제품의 정밀도를 유지시킬 수 있는 새로운 가공방법으로 최근에는 실제 생산현장에서 semi-dry 절삭의 실용화가 진행되고 있다.<sup>4)</sup>

따라서 본 고에서는 최근의 극미량 윤활용 절삭유제의 개발동향과 극미량 윤활의 효과에 관해 2002년 일본 트라이볼로지스트지에 게재된 해설기사<sup>5)</sup>를 참고로 하여 소개하고자 한다.

## 2. 극미량윤활 시스템

유제를 분무화시켜 윤활부위에 공급하는 방법은 오래 전부터 행해져 왔으나 극미량 윤활 시스템은 극히 적은 양의 유제를 다량의 압축공기와 혼합시켜 초미립 오일분무를 만들어 압축공기와 함께 가공부위에 공급하는 점이 특징이다. 그림 1에 극미량 윤활용 오일분무 공급장치를 나타내었다. 이때 중요한 것은 오일입자의 크기로 대개 0.6~1.0 $\mu\text{m}$  정도의 크기를 갖는 것으로 알려져 있다. 이러한 초미립의 오일입자는 중력

이나 원심력의 영향을 적게 받기 때문에 절삭부위까지 매우 효과적으로 도달할 수 있으며 절삭공구와 피삭제와의 직접적인 접촉을 막아 발열이나 공구마모를 줄이며 절삭저항을 저감시키고 가공정밀도를 향상시킬 수 있다. 따라서 극미량윤활에서 가장 중요한 점은 초미립의 균일한 오일입자를 생성시키는 균일성과 초미립 상태를 유지한 채로 절삭부위에 도달될 수 있는 운반성이라 할 수 있다.

현재 주로 사용되고 있는 절삭유 급유방식에서는 칩 배출성을 유지하고 가공부위의 마찰열을 막기 위해 물을 냉각재로 사용하고 있으나 극미량윤활에서는 압축공기가 절삭 칩을 배출하고 가공점의 냉각 역할을 한다. 냉각효과를 높이기 위해 압축공기를 냉각시켜 냉풍으로 공급할 수도 있으며 일부에서는 공기대신에 질소가 사용되 는 경우도 있다.<sup>6)</sup>

일반적으로 유제의 공급량은 수~수십 mL/h 정도이며 압축가스의 공급압력은 공장용 압축공기로 대응될 수 있는 0.2~0.4 MPa 이다.

극미량윤활 가공방법은 아래와 같은 특징을 갖고 있다.

- (1) 절삭유의 사용량을 과거의 가공방법과 비교해 1/20~1/50 정도로 감소시킨다.
- (2) 절삭칩에 유제가 거의 묻지 않으므로 칩의 재활용성이 향상된다.
- (3) 공작물에 부착되는 유제량이 매우 적기 때문에 세정공정을 간략화시킬 수 있으며 세정액의 수명을 크게 연

- 장시될 수 있다.
- (4) 동작기계의 소비전력 중 큰 부분을 차지하는 유제순환용 펌프가 불필요하게 되므로 전력소비를 크게 줄일 수 있다.
  - (5) 유제관리가 필요없다.
  - (6) 폐액이 발생하지 않는다.
  - (7) 극미량윤활시스템 장치를 기존의 설비에도 간단하게 설치할 수 있다.

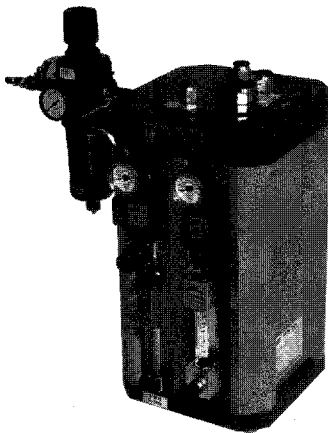


그림 1 오일분무 공급장치

이와 같이 극미량윤활 가공공법은 환경에 적합할 뿐만 아니라 에너지를 절약할 수 있는 방법으로 국내에서도 극미량윤활 가공방법을 채택하는 기계가공 업체가 늘어나고 있는 추세이다.

### 3. 극미량윤활시스템용 절삭유제의 요구성능

환경친화적인 극미량윤활 가공이 개발된 시초에는 생분해성이라는 측면에서 가공유제로 식물유를 사용하였으나 식물유에 포함된 불포화 이중결합에 의한 물성저하로 인해 최근에는 생분해성을 갖는 합성에스테르계 오일이 많이 사용되고 있는 추세이다. 극미량윤활용 유제로 식물유와 합성에스테르에 대해 사용 시의 성능을 비교 평가하였다.<sup>7)</sup>

#### 3.1 환경적합성

극미량윤활 가공에서는 미립자화된 유제가 가공 시스템 밖으로 배출되거나 칩에

표 1 각종 기유의 생분해성<sup>8)</sup>

오일의 종류 및 구분		40 °C동점도 (cSt)	생분해도, % (CEC-L-33-A-93)
광유계 기유	수소화정제 기유	30.0	40
합성 에스테르 계	TMPT(trimethylolpropanetriheptanate)	14.0	99
	PETE(pentaerythritol tetraester)	33.5	99
	DTDA(diisotridecyl adipate)	26.1	84
폴리알킬렌그리콜 계	폴리에틸렌그리콜	14.1	>70
	폴리프로필렌그리콜	-	<15
식물유 계	유채유	35.23	98
	대두유	31.96	98
	피마자유	255.1	97

물은 상태로 옥외로 반출되므로 배출된 유제의 환경에 대한 적합성이 우수해야 한다. 따라서 극미량유회용 절삭유제로서는 우선 생분해성이 가장 중요하게 요구되는 성능이다. 다음 표 1에 각종 유회기유의 생분해성을 나타내었다.

과거 절삭유제의 기유로는 광유나 폴리알킬렌글리콜계의 합성유 등이 사용되었으나 이들은 표 1에서 보는 바와 같이 생분해성이 낮기 때문에 극미량유회용 유제로는 일반적으로 95% 이상의 생분해도를 나타내는 식물유를 많이 사용하고 있다. 또 지방산과 알콜의 반응에 의해 얻어지는 합성에스테르오일도 80~90% 이상의 비교적 높은 생분해성을 보이고 있다

### 3.2 박막산화안정성(점착성)

극미량유회 가공에서는 미립자화된 유제가 공작기계 내·외부 또는 배출되는 절삭 칩과 공작물 표면 등에 부착된다. 이때 유제가 묻은 공작기계, 절삭 칩이나 공작물 등이 장시간 공기 중에 방치되면 박막형태로 부착되어 있는 유제가 산화되기 쉽다. 즉, 산화되기 쉬운 성분이 유제에 포함되어 있을 경우 짧은 시간에 산화열화가 진행되어 끈적거리는 점착성 막이 형성되어 작업성이 저하될 우려가 있다.

실제로 폴리올에스테르계 합성유와 식물유인 유채유를 선택하여 알루미늄제 용기에 얇게 도포하고 70 °C, 168시간동안 가열한 후 유제의 분자량 변화를 GPC로 분석해 보

면 합성에스테르 오일의 분자량 변화는 매우 미미하나 식물유인 채종유는 분자량이 약 70% 까지 증가하는 현상을 보였다.

식물유는 글리세린과 지방산의 에스테르 화합물로서 지방산이 포화지방산인 경우는 상온에서 고상으로 변해 절삭유로서의 사용이 불가능하므로 절삭유제로 사용가능한 식물유는 상온에서 액상을 유지할 수 있는 불포화지방산의 에스테르계 식물유를 사용해야 한다. 그러나 불포화 이중결합을 포함하는 식물유(유채유, 대두유, 해바라기유 등)는 산화중합을 일으키기 쉬운 성질을 갖고 있기 때문에 분자량이 크게 증가하는 현상을 나타내고 있다. 따라서 극미량유회용 유제로 유채유와 같은 박막산화안정성이 떨어지는 식물유를 사용하면 산화중합을 일으켜 점착성이 증가하고 유제가 경화될 우려가 높다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 저장안정성

극미량 유회가공에서 유제공급량을 20mL/h로 하루 8시간 작업하는 경우 소비량은 약 160mL에 불과할 정도로 매우 적은 양의 오일이 사용되므로 저장안정성이 나쁜 유제를 사용하는 경우 유제 저장용기 내에서 산화에 의해 유제의 성능이 저하될 가능성이 있다.

이를 확인해 보기 위해 100mL의 유리병에 폴리올에스테르 오일과 식물유인 유채유를 각각 50mL 주입하고 개봉한 상태로 70 °C의 전기 오븐에 저장하면서 시간경과

에 따른 점도와 전산가 변화를 측정하여 그 결과를 그림 2와 3에 나타내었다.

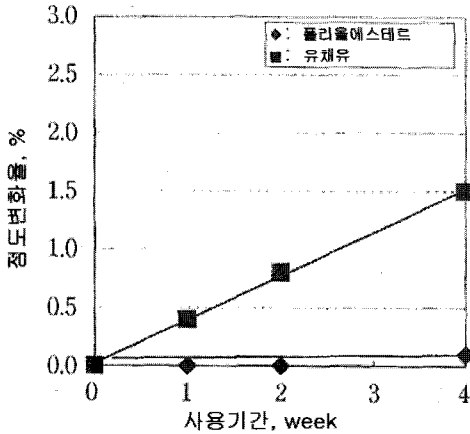


그림 2 시간에 따른 점도변화율

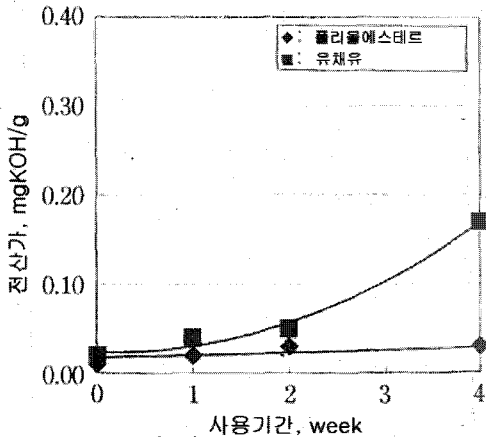


그림 3 시간에 따른 전산가변화

폴리올에스테르 오일은 4주가 경과해도 점도, 전산가 모두 거의 변화가 없으며 산화열화 및 열에 의한 열화가 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 그러나 유채유는 서서히 점도와 전산가 변화가 상승하여 열화되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 산화 및

열안정성이 떨어지는 식물유를 장기간 보존하는 경우에는 세심한 주의가 필요하다.

### 3.4 극미량윤활 시스템과의 적합성 및 일반물성

극미량윤활 시스템에서는 오일입자의 크기를 조절하는 것이 중요하며 크기가 너무 크면 오일 공급장치의 배관 내에 부착되어 절삭부위까지 유제가 공급되기 어렵고 크기가 너무 작으면 절삭점에 대한 유제의 부착성이 떨어지게 된다. 따라서 분무되는 오일입자의 적절한 크기는 2 $\mu$ m 이하, 평균 1 $\mu$ m 전후로 되는 것이 좋다고 알려져 있다<sup>9)</sup>. 일반적으로 분무 오일입자의 크기는 유제의 점도에 의존하며<sup>10)</sup> 극미량윤활용 유제는 ISO VG 10~32 정도의 점도를 갖는 것이 많이 사용된다. 또 추운 지역에서 사용하거나 냉풍가공의 경우를 예상하여 적어도 -20 $^{\circ}$ C 이하의 유동점을 갖는 것이 바람직하다.

### 3.5 절삭성능

극미량윤활 가공은 기존에 널리 사용되고 있는 에멀전 타입의 수계 절삭공법과 비교하여 매우 적은 양의 유제로 가공하므로 윤활상태를 경제윤활에 가까운 조건으로 유지할 필요가 있다. 따라서 극미량윤활용 유제의 절삭성능은 금속면에서의 흡착성 또는 반응성에 의해 좌우된다. 또 기존의 수계 절삭유와 같이 황계나 염소계 극압제를 첨가하는 것은 환경적합성의 차원에서 바람직하지 않으므로 극미량윤활용 절삭유

제에는 기유 자체만으로 우수한 절삭성능이 요구된다.

따라서 절삭성능의 평가를 위해 경계윤활 조건에서의 윤활성 평가에 대표적인 Falex 마모시험을 통해 구조가 서로 다른 3종의 폴리올에스테르 오일과 식물유인 유채유를 선정하여 유제의 구조에 따른 윤활성 차이를 평가하였다. 그 결과 표 2에서 보는 바와 같이 폴리올에스테르 오일 A의 마모량이 가장 적게 나타났으며 유채유의 마모량이 가장 많은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 동일한 폴리올에스테르 오일이라도 분자구조의 차이에 의해 경계윤활막 형성이 달라져 윤활성에 차이가 있는 것으로 추정할 수 있었다.

표 2 Falex 마모시험에 의한 마모량 비교

	PIN 마모량, mg	V-Block 마모량, mg
폴리올에스테르 오일 A	17.1	0.2
폴리올에스테르 오일 B	17.9	0.4
폴리올에스테르 오일 C	19.8	0.3
유채유	25.5	0.4

#### 4. 극미량윤활 가공에 있어서 유제의 작용기구

##### 4.1 단속절삭에 있어서의 효과

극미량윤활 가공의 효과를 실제 가공 중에 확인해 보기 위해 엔드밀 가공법을 이용하여 극미량윤활과 기존의 수용성 절삭

유, dry 절삭 등 3가지 방법으로 가공하면서 절삭속도에 따른 공구의 마모넓이를 측정하여 그림 4에 나타내었다.<sup>11)</sup> 절삭속도 200m/min까지는 극미량윤활의 경우가 수용성 절삭유로 가공한 것보다 마모넓이가 더 작은 것을 알 수 있다. 이와 같이 극미량윤활에 의한 가공이 공구마모가 적은 이유는 공구의 열적 충격에 의한 영향으로 추정된다. 즉, 수용성 절삭유를 사용하여 엔드밀 가공과 같은 단속적인 절삭가공을 할 때 공구 가동 중에는 마찰열에 의해 공구의 온도가 높아지지만 가동이 중단된 상태에서도 계속 급유가 되므로 공구가 물에 의한 냉각작용으로 냉각된다. 따라서 공구는 고온과 저온에 반복적으로 노출되면서 열적 충격을 많이 받게 된다. 그러나 극미량윤활의 경우는 가동을 하지 않는 동안에 계속 급유가 된다고 해도 압축공기에 의한 냉각능력이 낮기 때문에 열적 충격을 비교적 적게 받아 공구마모의 저하에 기여하는 것으로 생각된다.

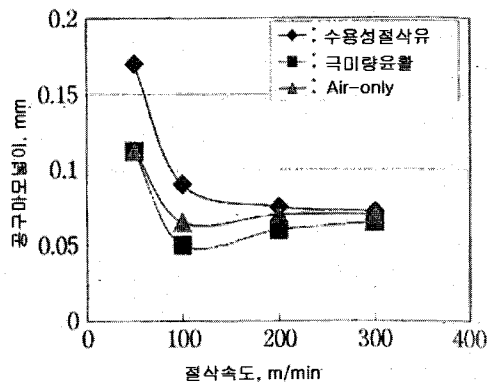


그림 4 절삭속도에 따른 공구 마모넓이

### 4.2 연속절삭에 의한 효과

선삭가공과 같은 연속절삭에서는 단속절삭과 달리 유제가 가공점까지 균일하게 공급되기 어렵기 때문에 극미량윤활 가공의 효과가 나오기 어려운 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup>

그러나 극미량의 유제를 확실하게 가공점 근방에 공급하면 단속절삭과 마찬가지로 효과가 기대될 수 있는 것으로 보고되어 있다.<sup>13)</sup>

그림 5에 선삭가공 시에 공구와 피삭재 사이의 마찰계수와 피삭재의 표면거칠기를 나타내었다. 극미량윤활 가공 시에 마찰계수는 비수용성 절삭유제 (S=3.5%)를 사용한 통상적인 절삭유 급유가공과 거의 동일한 수준이며 dry 가공보다는 우수하였다. 또 표면조도 역시 극미량윤활 가공과 절삭유 급유가공이 거의 유사한 결과를 나타내었다.

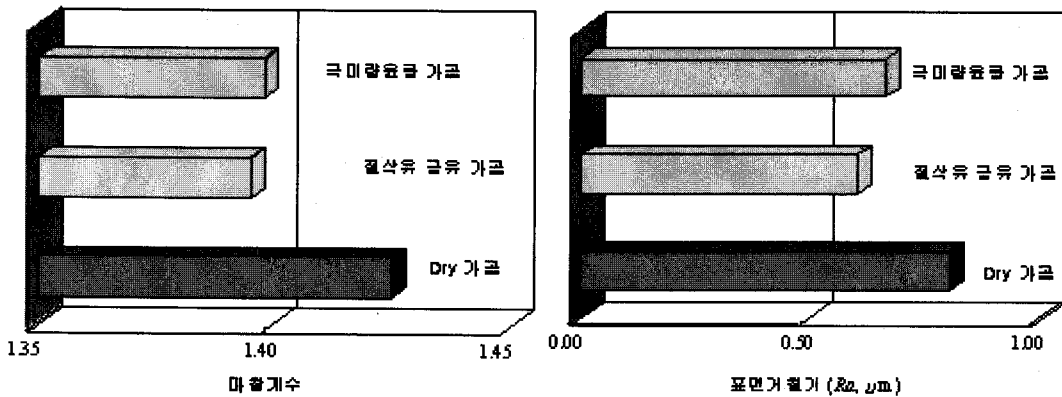


그림 5 선삭가공에 있어서의 가공법에 따른 마찰계수와 표면조도 측정 결과

한편 dry가공의 경우에는 사용한 공구 6개 중 2개에서 결함이 관찰되어 dry가공에서는 마찰 저감효과가 충분치 못하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 극미량윤활 가공이나 절삭유 급유가공에서는 공구의 마모나 결함이 두드러지게 나타나지 않았으나 절삭유 급유가공의 공구칼날을 확대하여 SEM으로 관찰하면 유제의 과냉각에 의해 생성된 것으로 추정되는 crack이 관찰되었다.

이상과 같이 실제 가공현장에서의 비교

실험 결과 극미량윤활 가공에서는 기존의 절삭유 급유가공 시에 다량의 유제를 사용함으로써 발생할 수 있는 공구의 과냉각에 의한 공구 손상을 피할 수 있으며 극미량의 유제가 공구 마찰면에 윤활막을 형성하여 마찰을 저감시키고 공구 마모를 방지함으로써 기존의 절삭유 급유가공법과 동등한 정도의 가공성능을 보이고 있는 것으로 판단되었다.

### 5. 결론

지금까지 극미량윤활용 절삭유제로서 식

물유와 폴리올에스테르 오일의 환경친화성, 산화안정성, 저장안정성 등의 물성과 절삭 성능 등에 대해 비교해 보았다. 극미량윤활 가공유제로 적절한 화학구조를 갖는 폴리올에스테르 오일을 선정하여 사용하는 경우 기존의 절삭유 급유가공과 비교해 거의 동등 이상의 절삭성능을 가지면서 작업 환경개선효과가 훨씬 우수하며 환경친화적이라는 것을 알 수 있었다.

앞으로 환경보호를 위한 법적, 제도적 규제가 더욱 강화될 것으로 예상되는 현 시점에서 극미량윤활 가공법을 보다 가혹한 조건 (난삭재 가공, 중절삭가공 등)에 응용하기 위해서는 많은 검토가 필요하며 극미량윤활용 절삭유제에 대한 보다 우수한 성능향상 및 환경에의 적합화 등이 기대된다.

#### 참고문헌

- (1) 일본공업규격 JIS K 2241 (2000).
- (2) 木寸正芳, 月刊 트라이볼로지, 2, 39 (2000).
- (3) F. Klocke, Dry Cutting, *Annals of CIRP*, 46(1), 519 (1997).

- (4) 환경대응 MQL 절삭유, 日石三菱 리뷰, 42(1), 37 (2000).
- (5) S. Suda, *Tribologist*, 47(7), 550 (2002).
- (6) 日本機械學會 2001年度 年次大會 講演資料集(VII), 206 (2001).
- (7) S. Suda, 2001年度 精密工學會 秋季大會 심포지움 資料 168 (2001).
- (8) Biodegradable fluids and lubricants, *Ind. Lub & Trib.*, 48(2), 17 (1996).
- (9) 極少量 切削油 供給시스템, 潤滑經濟, 47(5), 43 (1999).
- (10) 小松富士夫, 切削油의 環境對應技術, 潤滑經濟, 43(6), 6 (1995).
- (11) 今井英明, 超硬엔드밀에 의한 dry切削加工, 型技術, 14(7), 102 (1999).
- (12) 笹原弘之, 오일미스트 供給에 의한 高速엔드밀 加功時의 工具磨耗에의 影響, 精密工學會誌, 66(1), 80 (2000).
- (13) 佐藤潤幹, 極微量 切削液 供給에 의한 旋削加工, 日本機械學會 論文集 (C編), 62(604), 4696 (1996).