

## 지방산과 폴리에틸렌글리콜의 혼합에 따른 수용성 절삭유제의 절삭특성

김영운\*, 정근우\*, 윤유정\*, 김세훈\*\* , 강석춘\*\*\*

### Drilling Properties of Water-Based Metal Working Fluid Containing Fatty Acid and Polyethylene Glycol

Young-Wun Kim\*, Keun-Wo Chung\*, Yoo-Jung Yoon\*,  
Se-Hun Kim\*\* and Suck-Choon Kang\*\*\*

#### ABSTRACT

Synthetic water-based metal-cutting fluids are increasingly popular in the metal-working industry because of its environmental friendliness. The purpose of this study is to investigate the synergistic effect of combining polyethylene glycol and common fatty acid in formulating a metal-cutting fluid. The tested metals were aluminum, copper and steel, and the test was performed with a modified drilling machine. From the study, it was found that there existed some synergistic effects on the drilling efficiency of the metals to decrease of cutting time, cutting energy, torque as well as the smoothness of surface depended on the formulation ratio of the two fluids.

**Key Words** : Synthetic Metal-working Fluids(합성 금속가공유제), Polyethylene Glycols(PEG, 폴리에틸렌 글리콜), Triethanolamine(TEA, 트리에타놀아민), Fatty acid(지방산), Synergy effects(상승효과)

#### 1. 서론

여러 가지 금속재료의 불필요한 부분을 공구로 절삭이 요구되는 형상으로 가공하는 금속가공분야에서, 가공능률이나 가공정밀도를 높이기 위하여 절삭유제라고 불리는 액상의 물질이 사용되고 있다. 절삭유제는 공업규격에 따라 비수용성과 수용성으로 구분되고, 현재 비수용성 절삭유제가 절삭 성능과 부식방지성이 우수하여 주로 사용되고 있다. 그러나, 최근에 비수용성 절삭유제에 대하여 가

공작업과정과 폐유처리과정에서 유독성과 환경공해상의 문제가 제기됨에 따라 환경친화적인 수용성 절삭유제의 개발과 이들의 사용이 점차 증가하고 있다. 지금까지 개발된 수용성 절삭유제는 비수용성 절삭유제에 비교하여 절삭성능이 떨어지고 작업 중에 거품이 생성되는 등 문제점이 제기되어 이들을 해결하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 절삭성능을 향상시키기 위하여 수용성 내마모첨가제를 합성하여 첨가제로 사용하려는 연구가 주류를 이루고 있다. 수용성 내마모제로 폴리알

\* 한국화학연구소 응용화학연구부

\*\* 수원대학교 기계공학과 대학원

\*\*\* 수원대학교 기계공학과

킬렌글리콜의 지방산 에스테르<sup>[1]</sup>, 폴리알킬렌글리콜 에테르<sup>[2]</sup>, 폴리알킬렌글리콜과 경계윤활향상제인 지방산의 혼합물<sup>[3]</sup>인 에틸렌옥사이드와 프로필렌옥사이드의 에스테르<sup>[4]</sup>, 이염기산의 모노에스테르<sup>[5]</sup>, 히드록시스테아린산의 에스테르<sup>[6]</sup> 등이 있고, 이들을 첨가한 절삭유제의 절삭성능에 관한 논문이 최근에 발표되고 있다. 그러나, 수용성 내마모제와 경계윤활특성을 향상시키기 위한 첨가제와의 혼합 사용에 따른 절삭성 향상의 시너지효과에 관한 연구 논문은 거의 발표된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 경계윤활첨가제인 탄소의 수가 12~18인 지방산과 수용성 내마모제로 많이 사용되고 있는 폴리에틸렌글리콜을 다양한 혼합비로 혼련한 절삭유제의 물리적, 화학적 성질을 분석하고, 이들의 마찰특성 및 절삭성능평가를 위하여 가장 널리 사용되고 있는 기계재료인 알루미늄, 구리 및 강을 관통가공하면서 절삭시간, 토크, 에너지의 크기, 가공면의 표면조도 등을 측정하였고 그 결과를 고찰하였다.

## 2. 절삭유제의 기능과 절삭시험

### 2.1 절삭과정에서 절삭유제의 기능

금속의 절삭 가공에서 공구와 피삭재의 접촉부위에 주입하여 절삭가공성을 개선하고 제품의 질적 향상과 경제적인 가공을 목적으로 사용하는 절삭유제의 주요 기능은 다음과 같다.

첫째, 공구측면과 구멍 또는 절삭부위와의 윤활 작용으로 상대운동 부위의 마찰을 감소시켜 칩의 유출을 용이하게 하고 공구마찰을 감소시켜 가공속도를 높이고 공구의 수명을 연장시킨다. 둘째, 냉각 작용으로 고속회전에서 가공할 경우 발생하는 마찰열을 흡수하여 공구수명을 연장하거나 가공정밀도를 향상시킨다. 셋째, 침윤작용으로 절삭유제가 가공하고자 하는 피삭재의 마찰계면에 침투하여 공구와 피삭재 사이의 거리를 유지하여 가공면을 깨끗하게 해준다. 넷째, 공작물의 산화 및 부식을 방지하는 방청작용을 한다. 그 밖의 기능으로는 생성된 칩이 공구날 끝에 부착하거나 응착되는 것을 방지하는 작용과 세척작용 등이 있다.

드릴가공중에 윤활 영역은 크게 경계윤활영역과 금속과 금속의 접촉영역으로 나누어 설명할 수 있다. 금속과 금속의 접촉영역은 피삭재의 구멍 전면과 드릴 날의 끝이 접촉하는 영역으로써 날카로

운 공구단면과 작용하중에 의한 높은 접촉응력을 받음으로써 윤활막이 형성되지 않고 드릴 날과 피삭재의 직접 접촉이 일어나며 절삭이 이루어지는 영역이다. 이 영역에서는 피삭재와 드릴날이 접촉하기 때문에 공구 날의 높은 응력과 접촉부의 온도가 높이 상승하기 때문에 표면피막의 윤활제 기능을 기대하기가 어려워진다. 경계윤활영역은 드릴가공이 시작되어 생긴 구멍과 드릴 날 옆면과의 접촉 부분으로 절삭유제에 의한 윤활제의 흡착 분자피막이 형성되는 영역이다. 이 영역에서는 절삭유제에 함유된 지방산에 의한 경계윤활특성에 따라 피삭재의 절삭가공성능에 영향을 주게 된다. 따라서 절삭유제는 지방산이 피삭재인 금속에 물리적으로 흡착하여 생성된 경계윤활피막과 내마모첨가제와 금속과의 화학적반응에 의해 형성된 극압피막의 성질이 절삭성능에 영향을 미치게 된다.

### 2.2 절삭유제의 혼련 및 분석

수용성 절삭유제의 제조는 폴리에틸렌글리콜(Polyethylene glycol, 평균분자량 1,000. 또는 PEG로 함)과 탄소의 수가 12~18인 지방산을 트리에탄올아민(Triethanolamine, TEA)이 20 wt% 혼합된 물에 첨가하여 Table 1에서와 같이 6종의 수용성 절삭유제를 제조하였다. 절삭유제 1은 폴리에틸렌글리콜 20 wt%를 트리에탄올아민이 20 wt% 함유된 물에 혼련한 것이고, 유제 6은 지방산 20 wt%를 트리에탄올아민이 20 wt% 함유된 물에 혼련한 것이다. 유제 2-5는 폴리에틸렌글리콜과 지방산을 표에서와 같이 적당한 비율로 혼합한 것이다. 절삭유제의 pH는 Corning pH Meter를 사용하여 상온에서 측정하였으며 동점성계(Kinematic Viscosity, KV)는 Kohler Instrument사의 Model K-234 Utilited Kinematic Viscosity Bath와 Cannon-Fen sky Viscometer를 사용하여 ASTM D446-74의 방법으로 측정하였다. 폴리에틸렌글리콜과 지방산의열 안정성은 DuPont 951 모델 열 분석기를 사용하여 질소 분위기 하에서 측정하였다.

### 2.3 절삭유제의 마찰계수 측정

시험 절삭유제의 점성계수의 영향을 살펴보기 위하여 Pin-on-disk 시험기를 사용하여 마찰계수를 측정하였다<sup>[7]</sup>. 마찰계수는 핀을 직경이 8 mm이고

길이가 10 mm인 롤러 베어링으로 하고, 디스크는 동판을 100 x 100 x 5 mm 크기로, 표면조도는 1.7 μm(Ra)로 만들어 절삭유제 분위기에서 마찰력을 측정하고 이것을 수직하중으로 나누어 구하였다.

### 2.4 절삭시험용 재료

절삭유제들의 절삭성능을 시험하기 위해 구멍가공에 사용한 재료는 알루미늄(6063, 항복강도 15 Kg/mm<sup>2</sup>), 구리 및 강(SCM 21)이며, 크기는 100 x 100 x 50 mm의 각봉으로 하고 한번시험에 10 mm의 두께를 완전히 관통가공하였다. 구멍가공에 사용된 절삭공구는 직경이 3.5 mm 인 HSS 드릴 이었다.

### 2.5 절삭유제의 절삭성능 시험

절삭유제의 절삭성능을 평가하는 방법은 여러 방법이 있지만<sup>8-12</sup> 본 실험에서는 드릴링머신을 Fig. 1과 같이 개조하여 절삭성능을 평가하였고 절삭시험조건은 아래와 같다.

절삭시험의 조건 :

- 드릴 직경 : 3.5 mm, 6 mm
- 회전 속도 : 700 rpm
- 추 력 : 70 N, 170 N
- 가공구멍의 깊이 : 10 mm

절삭과정에서 공구에 가해주는 작용하중의 크기를 선정하기 위하여 많은 예비시험을 하였고 각 절삭유제에 대하여 절삭성능을 상대 비교할 수 있도록 가능한 낮게 설정하였다. 또한, 절삭시간은 절삭과정에서 하중을 가하는 순간부터 토크가 급격히 증가하였다가 감소하는 시간으로 하여 측정하였다. 절삭시험결과를 절삭유제 각각에 대하여 새로운 절삭공구를 사용하여 피삭재 10 mm를 구멍 가공하는데 소요되는 시간(sec)을 측정하였고, 각각의 절삭유제에 대하여 5회씩 절삭 시험을 실시한 후 측정치 중에서 최대, 최소치를 제외한 나머지 시간들을 평균하여 각 절삭유제의 절삭시간으로 하였다.

### 2.6 절삭 토크 및 절삭소모 에너지의 측정

드릴기에 의한 구멍가공과정에서 절삭공구가 피삭재에 가해지는 토크를 측정하기 위하여 드릴가공시험기의 시편부에 스트레인게이지를 부착하고,

중폭기(CHE74-DAS)와 기록계(YOKOGAW A-3025)를 사용하여 비틀림 토크를 측정하였다. 절삭공구에 작용하는 비틀림 토크 T(N·m)는 기록계에 나타난 토크를 다음과 같은 식(1)에 의해 계산한 것이다.

$$T = ( 5 T_{exp} / 6 ) \times 0.024 \quad (\text{식 1})$$

여기서  $T_{exp}$ 는 기록계에 나타난 토크의 크기이다.

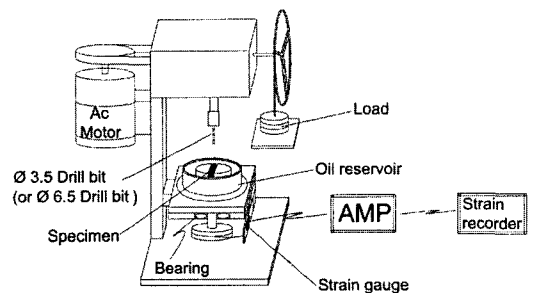


Fig. 1 Schematic diagram of the drilling-tester

절삭과정에서 측정된 공구의 토크중에서 가장 큰 값을 최대토크( $T_{max}$ )로 하였고, 전체 절삭과정의 토크의 크기를 평균하여 평균토크( $T_{avg}$ )로 하였다. 절삭가공시간 동안 소모된 에너지 E(N-m)는 식 2와 같이 평균토크( $T_{avg}$ )에 드릴의 각속도와 절삭시간 t를 곱하여 계산하였다.

$$E = \frac{2 \times \pi \times N \times T_{avg}}{60} \times t \quad (\text{식 2})$$

### 2.7 절삭면의 표면조도 측정

절삭 가공단면의 표면조도 Ra(중심선 평균조도)는 드릴 가공한 구멍을 구멍방향으로 절단한 다음에 표면조도계(Mitutoyo Surface Test-301)로 측정하였고, 절삭단면의 형상을 현미경사진으로 관찰하였다. 정밀가공의 경우에 표면조도가 작을수록 정밀한 가공을 한 것으로 다듬질 가공(Rimming)을 해줄 필요가 없게 되므로 작업시간과 가공비용을 절감할 수 있다.

### 3. 결과 와 고찰

#### 3.1 절삭유제의 기본 성질

Table 1에서와 같이 혼련한 수용성 절삭유제는 트리에탄올아민(TEA)이 20 wt% 함유된 물에 잘 용해되었다. 트리에탄올아민은 일반적으로 절삭유제에서 절삭용 작업물의 방청성능을 향상시키기 위하여 첨가해 주고 있다. 그러나 트리에탄올아민은 지방산과 반응하여 중성의 염이 형성된다. 지방산과 트리에탄올아민과의 반응으로 염이 생성되면 지방산과 폴리에틸렌글리콜과의 절삭성 향상을 위한 시너지(성능 상승)효과를 기대할 수 없다. 따라서, 지방산과 트리에탄올아민과의 반응여부를 확인하기 위하여 절삭유제의 pH를 측정하였다. 만약 지방산과 트리에탄올아민이 반응하여 지방산이 소모되면 지방산에 의한 pH의 감소는 관찰되지 않게 되어 pH는 일정하게 유지된다. Table 1에서 보여주는 바와 같이 지방산이 포함되지 않은 유제 1의 pH는 11.2이고 지방산만을 포함하고 있는 유제 6의 pH는 8.8로 지방산의 함유량에 따라 선형적으로 감소하였다. 따라서 지방산은 트리에탄올 아민과의 혼합에서 염이 형성되지 않음을 확인할 수 있었다.

#### 3.2 절삭유제의 마찰계수와 동점도

일반적으로 동일한 하중과 회전속도에서는 유제의 동점도가 클수록 유막생성이 용이해지므로 상대운동에서 마찰계수가 작아진다고 알려져 있다<sup>13)</sup>. 시험에 사용된 절삭유제의 동점도가 다르므로 이들이 금속간의 마찰계수에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 마찰계수를 측정하였다. Fig. 2는 시험 절삭

유제들의 동점도와 마찰계수를 비교한 것이다. 40°C에서의 동점도는 지방산의 함유량이 증가할수록 커지고 지방산만을 가진 유제 6번은 점도가 매우 크게 나타남을 보여주고 있다. 그러나 작용하중 10 N와 마찰속도 4.4 m/s에서 측정한 마찰계수는 유제 1의 경우에 0.220이고 지방산의 함유량이 점차 많아질수록 점진적으로 감소하여 12 wt%인 유제 4의 경우에 0.160로 최소가 된다 그러나 지방산의 함유량이 16 wt%로 증가하게 되면 마찰계수는 0.178로 다시 증가하였고 지방산만 함유된 유제 6의 마찰계수는 0.235로 최대가 됨을 알 수 있다.

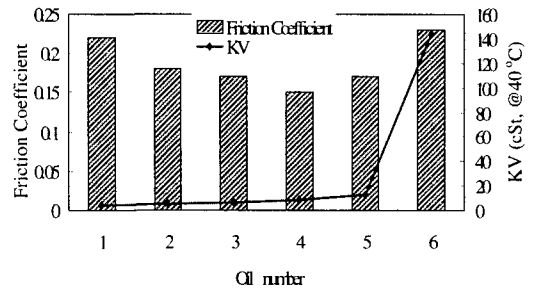


Fig. 2 The comparison of kinematic viscosity and the coefficient of friction of cutting oils

이와 같이 지방산의 함유량이 16 wt%인 유제 5와 폴리에틸렌글리콜이 함유되어 있지 않고 지방산만 함유된 유제 6은 유제 1-4보다 점도가 매우 큼에도 불구하고 마찰계수가 더 큰 것은 지방산이 경계 윤활특성을 갖고 있으나 높은 온도와 압력하에서 극압(extreme pressure)내마모특성이 발생하지 않기 때문으로 판단된다. 또 유제 1의 경우는 경계윤

Table 1 The properties of the cutting fluids

Oil No	1	2	3	4	5	6
TEA	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
PEG1000	20.0	16.0	12.0	8.0	4.0	0
fatty acid	0	4.0	8.0	12.0	16.0	20.0
water	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
pH	11.2	9.7	9.3	9.1	8.9	8.8
Kinematic viscosity (cSt @40 °C)	4.738	5.579	6.373	8.129	12.58	143.7

활성이 없기 때문에 마찰계수가 비교적 큰 것으로 판단되고, 두 기능을 동시에 가질 수 있는 유제 3과 4의 경우에 마찰계수는 다른 유제에 비해 마찰계수가 비교적 작다. 특히 유제 4의 마찰계수가 가장 작게 나타난 것은 유제에 함유된 폴리에틸렌글리콜과 지방산의 효과가 마찰계수감소에 가장 효과적으로 영향을 미친 것으로 판단된다.

### 3.3 절삭유제의 열 안정성 비교

구멍가공과정에서 드릴 날과 피삭재가 접촉하여 구멍가공이 일어나는 영역에서는 금속과 금속간의 접촉이 일어나고 다른 절삭된 부위에서는 경계유회영역이 된다. 경계유회영역에서는 충분한 유회막의 형성이 어렵고 드릴 날과 피삭재에서 발생하는 열 때문에 온도가 상승하여 형성된 경계유회막이 취약하게 된다. 또한, 구멍가공이 진행되면 구멍과 드릴 공구날의 옆면사이에는 혼합유회영역이 되고 가공과정에서 생성되는 칩들이 원활하게 배출되어야 한다. 이 영역에서는 절삭유제에 함유된 지방산과 폴리에틸렌글리콜이 피삭재 표면에 흡착하여 형성된 유회막이 절삭유제의 성능에 큰 영향을 미치게 되므로 구멍가공 중에 발생하는 온도에 대한 유회막의 열 안정성이 절삭성능에 영향을 미치는 중요한 인자가 된다.

따라서, 지방산과 폴리에틸렌글리콜의 열 안정성에 관하여 TGA를 통하여 분석하였다. Table 2에서 같이 유제 1(폴리에틸렌글리콜)은 열적으로 안정하여 400℃에서도 74%의 residue %를 갖는다.

반면에 유제 6(지방산)은 열에 불안정하여 residue %가 250℃에서 52.7%, 300℃에서는 1.5%로 이 온도에서 완전히 분해되는 것으로 나타났다. 폴리에틸렌글리콜과 지방산이 혼합되어 있는 절삭유제 2-5의 경우에 300℃ 이상의 온도에서 residue difference %가 양의 수를 나타내어 실제로 측정된 residue %가 이론적으로 계산한 residue %보다 더 높았다. 따라서 절삭유제에 폴리에틸렌글리콜을 첨가하게 되면 지방산의 열분해속도가 느려지게 되고 열 안정성이 향상되는 것을 알 수 있다. 300℃ 이상의 온도에서 열 안정성은 폴리에틸렌글리콜의 첨가량이 40% (유제 4) > 60% (유제 3) ≥ 20% (유제 5) > 80% (유제 2)의 순서임을 보여준다. 폴리에틸렌글리콜의 첨가로 절삭유제의 열 안정성이 향상되면 드릴 날의 옆면과 가공된 구멍표면사이에 형성된 유회피막이 구멍가공시간 동안 우수한 유회효과를 유지하게 됨으로써 구멍 가공 중에 생성된 칩의 배출이 용이하게 되고 마찰력을 감소시키는 등 절삭유제의 성능 향상에 도움을 준다.

### 3.4. 피삭재에 따른 절삭유제의 절삭성 비교

#### 3.4.1 알루미늄 피삭재의 절삭성 비교

Fig. 3은 70 N의 하중에서 알루미늄 피삭재의 10 mm를 구멍 가공하는데 소요된 절삭시간을 나타낸 것이다. 절삭유제에 지방산의 첨가량이 많아질수록 알루미늄 피삭재에 대한 절삭시간이 점차 감소하여 유제 4를 사용한 경우가 최소로 되고 지방산의 농도가 이것보다 더 많은 유제 5와 유제 6의

Table 2 The thermal stability of the cutting oils

Oil-No	PEG : Fatty Acid wt %		TGA				
			residue %				
			@200°C	@250°C	@300°C	@350°C	@400°C
1	100	0	99.6 <sup>a</sup> (99.6 <sup>b</sup> ) 0.0 <sup>c</sup>	98.7(98.7) 0.0	96.0(96.0) 0.0	90.4(90.4) 0.0	74.0(74.0) 0.0
2	80	20	98.3(98.6) -0.3	90.6(89.5) 1.1	81.9(77.1) 4.8	78.9(72.4) 6.5	66.6(59.2) 7.4
3	60	40	97.5(97.6) -0.1	80.4(80.3) 0.1	65.2(58.2) 7.0	62.2(54.5) 6.7	51.8(44.5) 7.3
4	40	60	95.3(96.6) -1.3	69.4(71.1) -1.7	47.0(39.3) 7.7	45.3(36.5) 8.8	38.9(29.8) 9.1
5	20	80	93.5(95.6) -2.1	66.6(61.9) 4.7	27.1(20.4) 6.7	26.0(18.6) 7.4	23.3(15.1) 8.2
6	0	100	94.6(94.6) 0.0	52.7(52.7) 0.0	1.5(1.5) 0.0	0.7(0.7) 0.0	0.3(0.3) 0.0

절삭시간은 오히려 크게 나타났다.

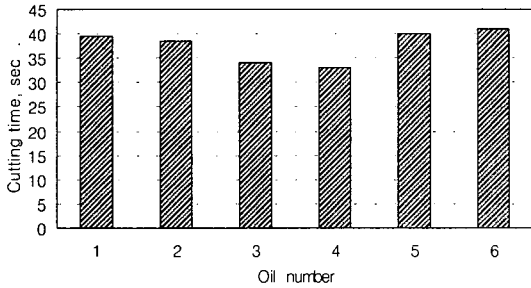


Fig. 3 The comparison of the cutting time for oils in cutting aluminum at 70 N

이와 같이 유제 5와 유제 6에서의 절삭시간의 증가는 경계윤활첨가제로 사용되는 지방산의 농도가 많아질수록 경계윤활피막 만으로 윤활 기능을 충분히 하지 못하기 때문으로 판단된다. 즉, 폴리에틸렌글리콜과 지방산이 적당한 비율로 함유되어 있는 유제를 사용하여 알루미늄 피삭재를 절삭할 경우에 저압을 받는 부위에서는 지방산에 의한 경계윤활효과를, 그리고 고온에서 높은 압력을 받을 부분에는 폴리에틸렌글리콜에 의한 내마모 피막의 특성을 동시에 받을 수 있어서 절삭유제의 윤활특성에 상승효과가 나타나는 것으로 사료된다. 각 절삭유제에 대하여 알루미늄 피삭재의 절삭과정에서 재료에 가해지는 최대 토크(N·m)를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다.

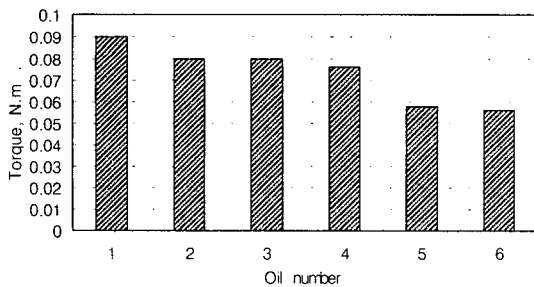


Fig. 4 The comparison of the maximum torque in cutting aluminum at 70 N

최대 토크는 경계윤활첨가제의 첨가량이 없거나 적은 경우에 크고 첨가량이 많아질수록 감소하

였으며 특히 5번과 6번 오일의 경우에 감소정도가 큼을 보여준다.

또 Fig. 5는 절삭과정에서 1, 4, 6번 오일의 토크 변화를 나타낸 것이다. 토크가 가장 큰 값은 내마모제인 폴리에틸렌글리콜을 첨가한 절삭유제의 경우에 절삭 초기에 나타났고 있다. 그러나 경계윤활첨가제만을 첨가한 6번 유제의 경우에는 절삭 시작부터 종료까지 큰 차이가 없으며 두 가지 첨가제 모두를 포함한 4번유제의 경우에는 1번과 6번 오일 특징의 중간성질을 갖는다. 4번 유제는 절삭과정에서 온도와 압력상승에 의한 내마모첨가제의 극압피막 생성이 마찰 토크를 감소시켜 주고 아울러 측면부에서 경계윤활특성이 작용하기 때문으로 판단된다. 또 절삭종료시점에서는 1번 절삭유제에서의 토크가 4번과 6번 절삭유제에서보다 낮게 나타나므로 극압상태에서는 내마모피막이 경계윤활피막보다 토크감소에 더 효과적임을 보여준다.

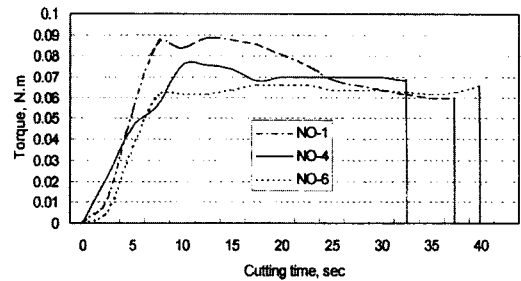


Fig. 5 The comparison of the torque during the aluminum cutting test

Fig. 4의 토크곡선 아래의 면적을 측정하여 구멍가공시에 소요된 총 에너지의 크기를 식 (2)에 의해 계산하고 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 절삭소요에너지는 유제 1에서 가장 크고 유제 5까지는 점진적으로 감소하다가 유제 6에서 다시 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 구멍가공의 경우에 드릴 날 끝의 윤활상태와 드릴 날 측면부의 유체윤활영역에서의 마찰감소를 얼마나 잘 시키느냐에 따라 절삭토크와 소요에너지의 감소에 지배적인 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

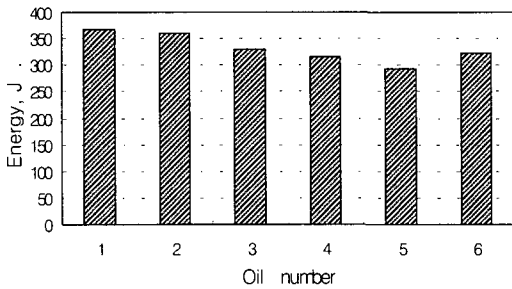


Fig. 6 The comparison of the cutting energy of aluminum at 70 N

구멍가공 한 알루미늄 피삭재의 표면 거칠기를 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 유제 1을 사용하여 절삭한 구멍의 표면조도가 약 5  $\mu\text{m}$ 으로 가장 거칠게 나타났고, 지방산의 함유량이 점차 많아질수록 조도가 작아져서 유제 3의 경우에 0.5  $\mu\text{m}$ 으로 최소가 되었다. 그러나 유제 3보다 지방산의 함유량이 더 많아지면 표면조도는 다시 커져서 유제 6의 표면조도가 3.7  $\mu\text{m}$ 임을 보여주고 있다.

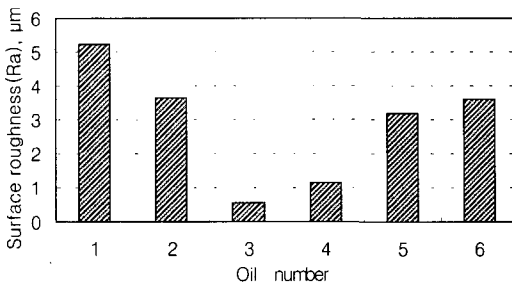


Fig. 7 The comparison of the cutting surface roughness of aluminum at 70 N

따라서 폴리에틸렌글리콜과 지방산이 혼합된 유제가 폴리에틸렌글리콜 또는 지방산만으로 제조한 절삭유제보다 피삭재 가공면의 표면조도가 작아지고 적당한 함유비에서 표면 거칠기가 가장 낮게 나타남을 알 수 있다. 절삭유제에 따라 알루미늄 피삭재의 구멍가공에서 절삭시간, 토크, 절삭에너지 및 표면조도의 분석결과를 종합하여 보면 폴리에틸렌글리콜과 지방산의 혼합비가 40/60인 유제 3, 또는 60/40인 유제 4를 사용하여 가공하였을 때의 절삭성능이 다른 혼합비의 유제에 비해 우수한 것으로 나타났다. 이것은 시험 절삭유제에 대한 열

안정성시험(TGA)에서 나타난 안정성의 평가결과와 같은 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

### 3.4.2 동 의 드릴가공

다른 금속에 비하여 마찰특성이 우수한 동(구리)을 피삭재로 하고 각각의 절삭유제에 대하여 70 N 하중에서 구멍가공시험을 하여 절삭시간의 크기를 Fig. 8에 나타내었다.

동의 경우에 절삭시간은 알루미늄에서와 같이 폴리에틸렌글리콜만으로 이루어진 절삭유제에서 가장 크고 지방산의 함유량이 많아짐에 따라 유제 4까지 거의 선형적으로 감소하였다. 그러나, 지방산의 함유량이 유제 4보다 더 많아지면 절삭시간은 다시 증가하고 있음을 보여준다.

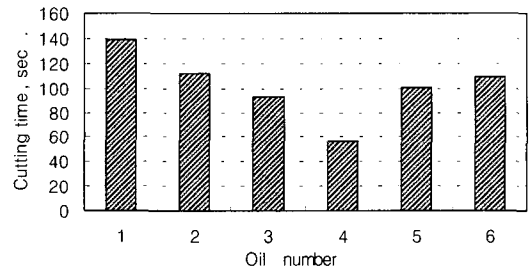


Fig. 8 The comparison of the cutting time for oils in cutting copper at 70 N

동의 절삭과정동안 피삭재에 가해지는 최대 토크  $T_{max}$ 의 크기를 Fig. 9에서 보여준다. 유제 1의 경우에 토크의 크기가 가장 크고 지방산이 함유하고 그 함유량이 증가할수록 토크의 크기가 점진적으로 낮아져서 6번 절삭유의 경우에 토크가 가장 낮게 나타났음을 보여준다. 대부분의 동과 동의 화합물은 내마모첨가제에 의한 내마모피막이 형성되지 않기 때문에 경계윤활첨가제의 영향만을 주로 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 동을 피삭재로 하여 구멍 가공할 때 절삭에 소요된 에너지의 크기를 나타낸 것이다. 절삭유제 1번 오일의 경우에는 절삭소요 에너지가 가장 크고 2번부터 점차 감소하다가 절삭유제 4에서 최소가 되고 5번과 6번의 절삭유제에서는 다시 절삭소요에너지가 증가하는 것을 보여주고 있다.

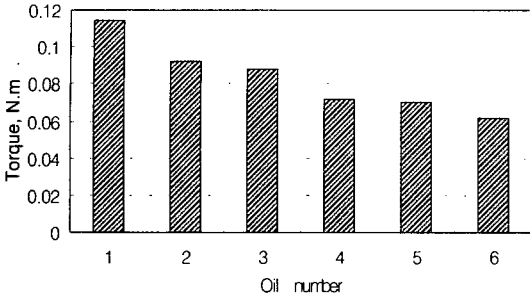


Fig. 9 The comparison of the maximum torque in cutting copper at 70 N

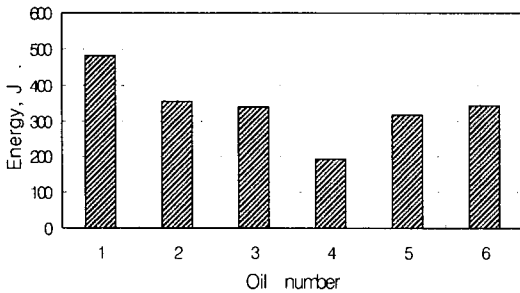


Fig. 10 The comparison of the cutting energy of copper at 70 N

Fig. 11은 여러 절삭유제를 사용하여 동 피삭재를 구멍 가공한 다음 가공면의 표면조도를 측정 비교한 것이다.

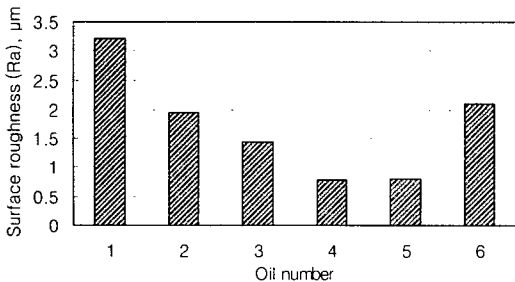


Fig. 11 The comparison of the cutting surface roughness of copper at 70 N

폴리에틸렌글리콜만 20 % 함유된 유제 1을 사용하여 절삭한 단면의 표면조도(Ra)는 3.2 μm이고 지방산의 함유량이 많아짐에 따라 거의 선형적으로

감소하여 유제 4의 경우에는 0.75 μm로 나타났다. 지방산이 유제 4보다 더 많이 함유된 유제 5의 표면조도는 유제 4와 같은 0.75 μm를 나타내어 알루미늄의 경우와 같은 경향을 갖지 않는다. 마찬가지로 지방산이 20 wt%만 함유된 절삭유제 6의 경우에는 표면조도가 2.1 μm로 비교적 거칠게 나타났다.

### 3.4.3 강의 드릴가공

가공재료를 연강으로 하는 구멍 가공시험에서 공구에 가해주는 하중은 알루미늄이나 동 경우보다 높여서 170 N의 하중으로 하고 각 절삭유제에 대한 절삭성능을 시험하였다. 각 절삭유제들에 대하여 구멍가공하고 소요된 절삭시간을 Fig. 12에 나타내었다. 폴리에틸렌글리콜만이 첨가된 유제 1을 사용한 경우의 절삭시간은 100 sec로 가장 길게 나타났다. 경계윤활첨가제를 포함하는 경우에 함유량이 많아질수록 점차 절삭시간이 감소하여 유제 4의 경우에 63 sec로 가장 짧게 나타났음을 보여준다. 그러나 지방산의 함유량이 유제 4보다 많은 유제 5와 6의 경우에는 절삭시간은 오히려 증가하였다. 따라서 절삭과정에서 폴리에틸렌글리콜과 지방산 모두가 강의 표면에 적절한 윤활피막을 형성하여 마찰을 감소시키고 유제 4와 같은 함유비를 가진 절삭유제의 경우에 절삭시간의 감소에 가장 효과적임을 알 수 있다.

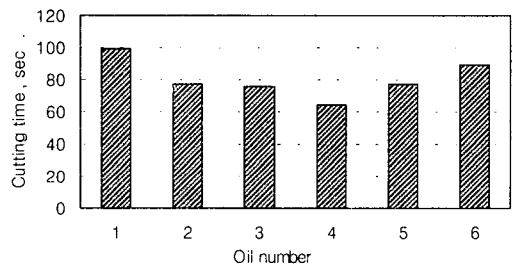


Fig. 12 The comparison of the cutting time for oils in cutting steel at 170 N

Fig. 13은 강의 구멍가공중의 최대 토크 Tmax를 비교한 것으로서 알루미늄이나 동을 절삭할 경우에는 달리 유제가 폴리에틸렌글리콜만 함유한 절삭유제 1의 경우에 최대 토크가 가장 작게 나타났다.

또 폴리에틸렌글리콜이 감소하고 경계윤활 첨



가제인 지방산을 포함시키면 지방산의 첨가량이 많아질수록 최대토크는 점차 커져서 절삭유제 6의 경우에 최대로 됨을 보여준다.

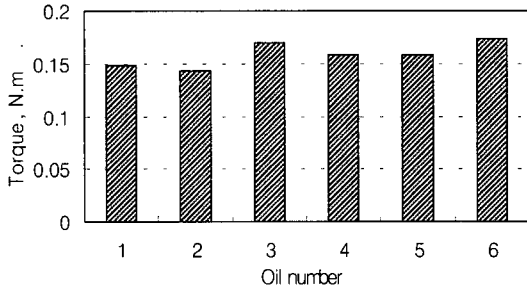


Fig. 13 The comparison of the maximum torque in cutting steel at 170 N

Fig. 14는 절삭유제 1번과 4번 그리고 6번의 절삭과정에서 나타난 토크의 변화를 나타낸 것이다. 1번 절삭유제의 경우에 절삭 초기 토크의 크기가 작고 또 절삭과정에서 점차 감소하고 있으나 6번 절삭유제의 경우에는 토크가 초기에 크고 또한 절삭중에 토크의 감소정도가 작음을 보여주며, 4번 절삭유제의 경우에는 1번과 6번 절삭유제가 가지는 성질의 중간상태를 갖는다. 따라서 절삭유제중에 포함된 내마모첨가제의 내마모피막생성에 영향을 많이 받고 있음을 보여준다. 이 내마모피막은 토크의 감소에는 도움이 되지만 공구 끝 절삭부분에서는 절삭 성능에 오히려 나쁜 영향을 미치게 되어 절삭시간을 길게 해주는 것으로 판단된다.

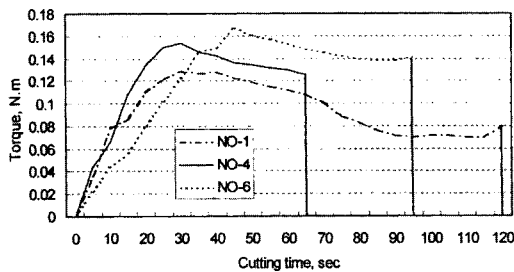


Fig. 14 The comparison of the torque during the steel cutting test

따라서 내마모피막과 경계윤활첨가제가 적당히

혼합된 경우에 절삭시간을 단축하게 되고 토크는 크게 나타나는 것으로 판단된다. 절삭유제에 따른 강 of 절삭에서 소모된 절삭에너지의 비교를 나타낸 Fig. 15에서 절삭에너지는 크게 차이가 나지 않으나 다른 절삭유제에 비교하여 4번 절삭유제의 경우에 가장 작게 소모되었음을 보여준다.

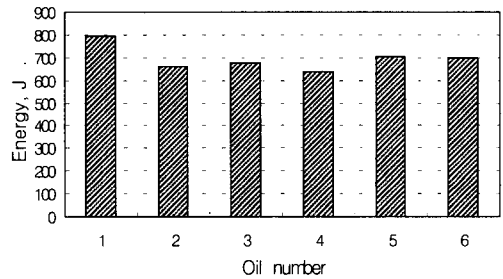


Fig. 15 The comparison of the cutting energy of steel at 170 N

또 강 of 가공단면의 표면조도를 Fig. 16에 나타내었다. 절삭유제 1의 경우에 표면조도는  $3.7 \mu\text{m}$ 이고, 유제 2의 경우  $2.6 \mu\text{m}$ , 유제 3의 경우 최소인  $1.2 \mu\text{m}$ 으로 지방산의 함유량이 많아짐에 따라 감소하였다. 그러나, 지방산의 함유량이 더 많은 유제 4의 경우에는 표면조도가 다시 커져서  $3.5 \mu\text{m}$ 이 되고, 유제 5의 경우에는  $4.2 \mu\text{m}$ 로 되며 유제 6의 경우  $5.5 \mu\text{m}$ 로 가장 큰 표면 거칠기를 갖는다. 따라서 절삭유제에 따라 구멍 가공한 표면 거칠기가 다르고 거칠기의 크기에 의해 절삭유제의 성능을 판단하는 기준이 될 수 있음을 알 수 있다.

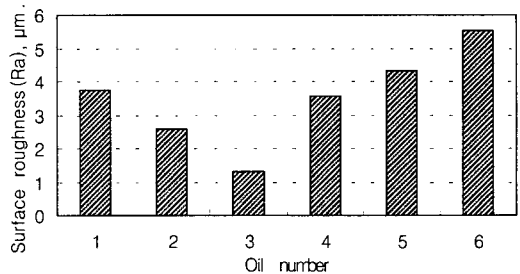


Fig. 16 The comparison of the cutting surface roughness of steel at 170 N

각각의 절삭유제를 사용하여 비교적 단단한 재

질인 강의 절삭시험에서 절삭시간, 토크, 회전에너지 및 표면조도 분석결과를 종합하면 폴리에틸렌글리콜과 지방산이 함유된 유제 3과 유제 4를 사용하여 구멍을 가공할 경우에 비교적 짧은 시간에 적은 에너지로 매끄럽게 절삭 가공할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

수용성 내마모첨가제인 폴리에틸렌글리콜과 경계윤활첨가제인 지방산을 다양한 함량으로 혼합하여 수용성 절삭유제를 혼련하고 이들에 대한 절삭 성능을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 폴리에틸렌글리콜과 지방산을 사용하여 혼련한 절삭유제의 동점도는 지방산의 혼합비가 많아지면서 점도가 점진적으로 증가하고 폴리에틸렌글리콜이 매우 적거나 전혀 혼합되지 않은 경우에는 매우 크게 나타났다.

2) Pin-on-Disk 시험기에 의한 유체마찰시험에서 마찰계수의 크기는 절삭유제의 점도와 일정한 상관관계가 없음을 보여주었다.

3) 폴리에틸렌글리콜과 지방산의 혼합비에 따른 열 안정성은 폴리에틸렌글리콜 40 wt%, 지방산 60 wt%인 유제에서 가장 우수함을 알 수 있었다.

4) 알루미늄, 동 그리고 강에 대한 절삭시험에서 폴리에틸렌글리콜과 지방산이 40 - 60%의 비율로 혼합된 수용성 절삭유제를 사용한 경우에 절삭 가공시간이 짧아질 뿐만 아니라 절삭 소모에너지가 적게 되고 또한 절삭 가공면의 표면조도가 작게 나타났다.

#### 참 고 문 헌

- Riddle. B. L. and Kipp. E. M, "Friction and Wear Properties of PEG Ester in the Presence of a Complex Phosphate Ester," Lub. Eng., Vol. 47, No. 12, pp. 991, 1991.
- Schottenberg. A. D, "Lubricating Additives," European Patent 183, 050, 1986.
- Yong. W, Qunji. X, and Lili. C, "Tribological Properties of some Water-Based Lubricants containing Polyethylene Glycol under Boundary Lubrication Conditions," J. of Synthetic Lubrication, Vol. 13, No. 4, pp. 375, 1997.
- Canter. N. M, Chaloupka. J. J, and Fischesser. G. J, "The Use of Ethylene Oxide / Propylene Oxide (EO/PO) Esters as Additives in Semi-Synthetic Metalworking Formulations," Lub. Eng., Vol. 44, No. 3, pp. 257-261, 1987.
- Watanabe. S, Nakagawa. H, and Ohmori. Y, "New Cutting Fluid Additives Derived from Half Esters of Dimer Acids", Tribologist, Vol. 42, No. 1, pp. 81-84, 1997.
- Nakagawa. H, Ohmori. Y, Watanabe. S, Fujita. T, and Sakamoto. M, "New Cutting Fluid Additives Derived from Esters of Higher Hydroxy Fatty Acids," Tribologist, Vol. 43, No. 5, pp. 436-439, 1997.
- Chung Dae-won, "The synthesis and frictional properties of lubricant-impregnated cast nylon," Wear, Vol. 239, pp. 244-250, 2000.
- Leep. H. R, "Investigation of Synthetic Cutting Fluids in Drilling, Turning, and Milling Processes," Lubr. Eng., Vol. 37, No. 12, pp. 715-721, 1981.
- Russell. W. R, "Cutting Tools for Cutting Fluid Evaluation," Lubr. Eng., Vol. 30, No. 5, pp. 252-254, 1974.
- Faville. W. and Voitik. R, "The Falex Tapping Torque Test Machine," Lubr. Eng., Vol. 34, No. 4, pp. 193-197, 1978.
- Hernandez. P. and Shiraki. H, "Comparison of Aqueous Extreme-Pressure Cutting Fluids on the No. 8 Tap Torque Tester and other Cutting Methods," Lubr. Eng., Vol. 43, No. 6, pp. 451-458, 1987.
- Wall. C, "The Laboratory Evaluation of Sheet Metal Forming Lubricants," Lubr. Eng., Vol. 40, No. 3, pp. 139-147, 1984.
- 강석춘 외, "윤활공학," 한국유화기기시험연구소, 정문출판사, pp. 122, 1991.