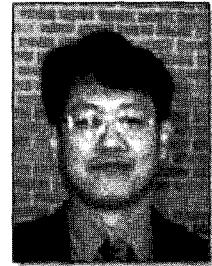


윤	활	연	구
---	---	---	---

금속가공유의 기계적 화학적 고찰



한국화학연구원
김영운 박사

1. 서론

금속가공유는 기계적인 구동 메카니즘에 의한 동력전달이나 방향 전환시 구동면에서 발생하는 마찰, 마모를 감소시키므로써 원활한 작동을 유지시켜 주는 윤활제의 일종으로 절삭유, 압연유, 열처리유 및 방청유등이 있다. 금속가공유 (Metalworking Fluids)는 기계가공공정에서 다듬질면의 개선, 가공정도의 향상, 공구수명의 연장, 가공물의 방청, 발생하는 열의 냉각 및 가공시 발생하는 칩을 효과적으로 배출할 목적으로 사용된다. 다음에서 금속가공유에 대하여 자세히 살펴본다.

2. 피삭재 가공 메카니즘 : 기계적 고찰

기계 가공에서 가장 단순한 기하학적 가공 모델은 그림 1에서와 같이 칩이 계속적으로 형성되면서 가공되는 것으로 설명할 수 있다. 피삭재가 공구의 절단 모서리에 대하여 회전함에 따라 칩이 생성되고, 공구

의 절단 모서리는 피삭재를 변형시키고 동시에 AB 라인을 따라 전단 힘이 생기게 된다. 공구의 절단 날은 이 엄청난 힘을 극복하면서 피삭재(workpiece) 속으로 칩을 밀어내면서 전단가공이 일어난다. 전단가공을 통하여 형성된 칩은 공구의 절단 면 위로 배출되게 된다. 피삭재의 전단 가공을 유발하는 힘은 다양하며 공구와 칩 사이에 압력을 유발하게 된다. 이러한 힘의 크기는 피삭재의 절단력에 따라 다르게 나타나는데 알루미늄 알로이의 경우 80,000psi (551.6 MPa)이고 알로이 스틸의 경우 400,000psi (2,758 MPa)에 이른다. 거친 칩은 높은 압력 하에서 공구의 날 표면에서 상당한 마찰을 일으킨다. 마찰력은 금속 가공에 중요한 영향을 미치게 되는데 마찰력이 크면, shear plane이 피삭재 surface와 이루는 각을 감소시키게 된다 (그림 2). 따라서, shear plane의 길이가 증가하게 되며 즉, 피삭재를 가공하는데 더 큰 힘이 필요하며 또한, 배출되는 칩의 두께가 굵어지고

피삭재의 변형을 초래하게 된다. 반면에, 공구와 배출되는 칩 사이에 마찰 감소는 반대의 영향을 미치게 된다. 이러한 마찰은 공구의 side edge와 피삭재 사이, 공구의 nose와 피삭재 사이에서도 일어나게 되며 공구의 마모를 가져오게 되고 피삭재의 가공이 원활하지 않게 된다. 그림 3에 절단 공구의 전형적인 공구 마모를 나타내었으며 금속가공 작업 중에 다양하게 발생하는 마찰을 줄이기 위해서는 금속 가공유의 사용, sliding 속도의 증가, 공구의 질 향상 (sharpness), 공구 절단 각 향상, 저 마찰 work metal 사용 등을 통하여 가능하다.

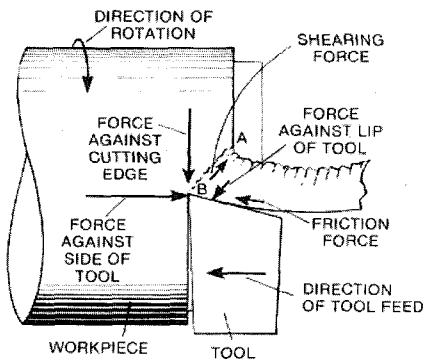


그림 1. 기계 가공 : Cutting Forces.

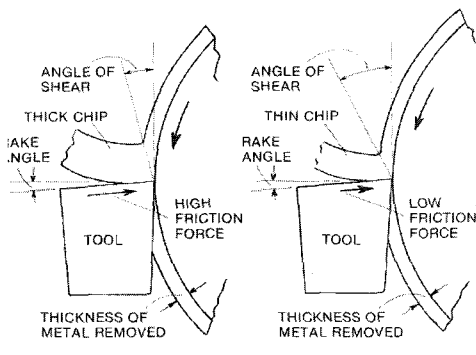


그림 2. 칩과 공구사이의 마찰의 영향.

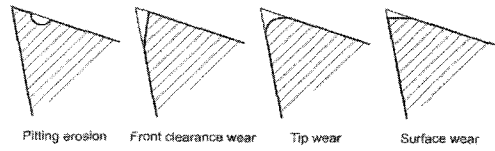


그림 3. 절단 공구의 여러 가지 마모 형태.

또한, shear plane과 칩에서 피삭재를 가공하는 일 및 마찰의 결과로 높은 온도가 발생된다. 그림 4에 금속가공유 없이 122 smm (surface meters per minute) 속도로 회전하는 피삭재(steel)를 가공할 때 발생하는 열을 상대 온도로 나타내었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 공구의 온도는 최대 788°C까지 올라가게 된다. 발생하는 높은 열은 피삭재의 강도를 급격하게 감소시켜 마찰에 대한 내성이 없어지고 수명이 감소하게 된다. 피삭재의 종류에 따라 온도에 따른 강도 감소가 다르게 나타날때, 카바이드 공구는 982°C에서도 강도 감소가 거의 일어나지 않지만 steel 공구는 649°C와 816°C 사이에서 강도가 급격히 감소한다. 이와 같은 이유로 금속가공유의 사용은 필수적이다.

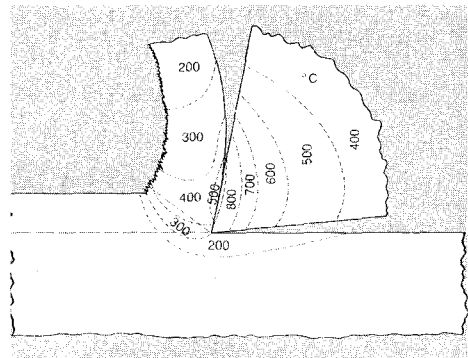


그림 4. 금속 가공에 있어서 공구와 피삭재의 상대적인 온도.

3. 금속 가공유의 작용

금속 가공시 다음의 5가지를 달성할 목적으로 금속 가공유가 사용된다. 상대적인 중요성은 피삭재의 재질, 금속 절단 속도, 사용되는 공구 및 마무리 물성등에 의존한다.

- 1) 공구와 피삭재의 냉각
- 2) 빌트-업-에지 (built up edge)의 조절
- 3) 마찰과 공구 마모의 저감
- 4) 방청성으로 피삭재 및 작업의 보호
- 5) 칩의 원활한 배출

앞에서 언급했던 것처럼 금속 가공시 발생하는 열 (온도)은 마모의 내성을 줄이고 결과적으로 공구의 수명을 단축하는 결정적인 요인으로 작용한다. 예를 들면, 공구의 온도가 14°C 감소하면 공구의 수명은 2 배로 연장된다. 열팽창을 감소시켜 온도를 조절하는 것은 금속 가공을 정교하게 유지하는데 효과가 있다. 공구를 냉각하는 과정은 두 가지 과정으로 이루어지는데 첫째, 금속 가공 과정에서 발생하는 열을 감소시키는 과정, 둘째, 생성되는 열을 직접 제거하는 과정으로 나눌 수 있다. 직접 냉각법은 여러 가지 요인에 의해 지배되는데 금속 가공유의 온도와 열적 물리적 특성에 의해 좌우된다. 즉, 금속가공유의 온도가 낮으면 낮을수록 유제와 공구사이의 온도 분포가 더 크게 되고 더 많은 열이 전달된다. 그림 5에 칩 두께와 절단 속도에 따라 피삭재 절단 표면의 온도를 나타내었다. 금속가공유의 냉각 효과는 열용량과 열전이 계수 같은 열적 특성에 의존하고 흐름 조

건에 따라 달라짐을 알 수 있다. 열전이 계수는 계면에서의 활성 물질과 증발에 따라 상당히 영향을 받는다. 이러한 이유로 높은 비열 및 잠재 열을 가진 물이 광유계 오일 보다는 더 효과적인 냉각제이다 (Table 1). 물론, 물 자체로는 녹을 발생시키고 금속가공유에 중요한 요구 물성이 부족하기 때문에 금속가공유로 사용할 수는 없다. 또한, 저점도의 광유계 오일이 고점도의 광유계 오일보다 더 효과적인 냉각제이다. 금속가공유는 공구와 칩, 피삭재와 공구 사이에 윤활막을 형성케 함으로써 생성되는 열을 감소시키게 된다. 게다가, 칩과 공구 사이의 마찰 저감 효과로 인하여 금속 가공 과정에서 변형되는 피삭재의 양을 감소시키고 결과적으로 발생하는 열을 감소시킨다.

Table 1. Differences between calorific data of mineral oil and water.

	Mineral Oil	Water
Thermal Conductivity, $Wm^{-1}K^{-1}$	0.1	0.6
Heat Capacity, $kW s kg^{-1}K^{-1}$	1.9	4.2
Heat of Vaporization at 40°C, $kW s kg^{-1}$	-	2400

그림 6에 금속가공유의 종류에 따른 냉각효과를 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이, water-mixed coolant 10% (v/v)의 냉각 효과가 dry cutting 과 neat cutting oil의 경우에 비해 우수함을 알 수 있다.

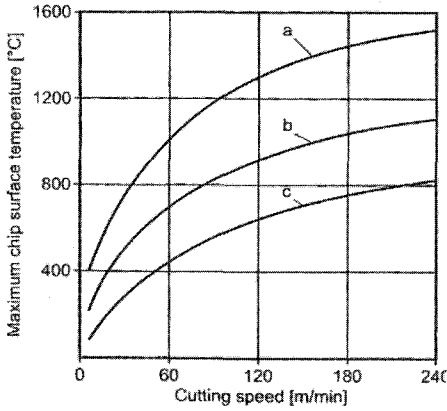


그림 5. 칩 두께(h)와 절단속도에 따른 공구 표면 온도.

- (a) $h = 0.062\text{mm}$;
- (b) $h = 0.25\text{mm}$;
- (c) $h = 1.00\text{mm}$.

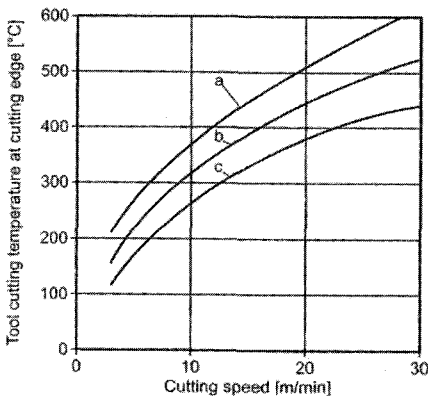


그림 6. 금속가공유 종류에 따른 냉각 효과.

- (a) dry cutting;
- (b) neat cutting oil;
- (c) water-mixed coolant 10% (v/v).

최근에 Greeley 등은 그림 7에서와 같이 HSS oil drill에 thermocouple을 장착하고

준 합성유형의 수용성 금속가공유를 사용하여 드릴 가공할 때의 토크, 트러스트, 온도 등을 평가한 결과, 그림 8에서와 같이 약 110°C 의 온도를 나타내었다고 보고하였다.

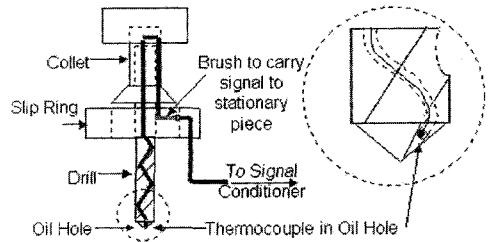


그림 7. Schematic of thermocouple placement and signal transfer.

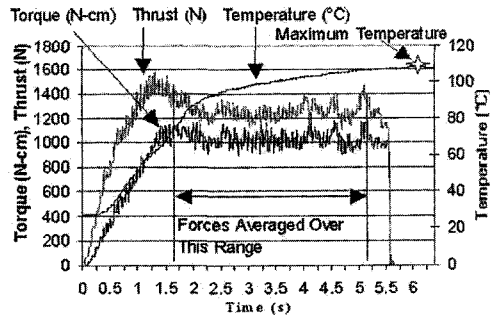


그림 8. A typical torque, thrust, and temperature response during drilling is shown.

4. 금속가공유의 분류

금속가공유는 여러 가지로 분류되고 있지만 일반적으로 광유계 오일형 과 수용성 금속가공유의 두 가지로 분류된다. 광유계 오일형 금속가공유는 1) Straight, non-additive 광유계 오일, 2) Fatty 광유계 오일, 3) Chlorinated 광유계 오일, 4) Sulfurized 광유계 오일, 5) Sulfurized fatty 광유계 오일,

6) Sulfo-chlorinated 광유계 오일, 7) Phospho-sulfurized 광유계 오일 등으로 세분화할 수 있다. 수용성 금속가공유는 물로 희석하면 우유 모양의 에멀전이 되는 유화유형 (에멀전형), 반투명 또는 투명의 용해형 (준합성유 포함) 과 합성유형이 있다.

4-1. 광유계 오일형 금속가공유 (Neat MWFs)

광유계 오일형 금속가공유는 수용성 금속가공유에 비해 여러 가지 장점이 있다. 첫째, 윤활성능이 우수하여 낮은 절단 속도에서 가공하여도 공구의 수명이 길고 표면 가공 정도가 우수하다. 둘째, 금속가공유의 유지 관리가 복잡하지 않아 금속가공유의 수명이 길다. 셋째, chlorine-free의 금속가공유는 녹 발생의 우려가 없다. 넷째, 금속 가공 중에 타유에 의한 오염의 염려가 수용성 보다 적다. 반면에 주요한 단점으로는 첫째, 피삭재의 냉각능력이 나쁘기 때문에 고속 절단 속도로 가공할 때 문제가 많이 발생한다. 둘째, 화재에 대한 우려가 있고 오일 미스트와 증기에 의한 위험 부담이 우려되기 때문에 사용자에게는 또 다른 비용 부담의 요인이 발생한다. 금속가공유를 사용하다 보면 여러 형태와 경로를 통해 인체와 접촉하게 되는데, 이러한 노출로 작업자들은 암, 호흡계통의 질병, 피부병, 미생물에 의한 질병등 건강 장애를 입게 된다. 특히, 금속 가공 중 발생하는 미스트의 일종인 오일 미스트는 여러 가지 환경오염을 유발하며 작업자의 피부 접촉과 기관지의 호흡에 의한 유해성 때문에 매우 중요하며 오일 미스트를 거의 발생하지 않는

금속가공유를 개발하는 연구가 활발하다. 오일 미스트에 대한 문제는 1996년 미국 산업안전보건청(OSHA)이 선정한 우선과제 중 하나일 정도로 산업보건의 중요한 과제이다. 그림 9에 오일 미스트 측정 장치를 나타내었으며 그림 10에서는 25°C 낮은 점도의 오일이 높은 점도의 오일보다 오일 미스트 양이 많아 광유계 오일형 금속가공유의 경우 오일미스트 양을 조절하기 위해서는 점도를 조절하여야 하는 것을 알 수 있다. 셋째, 오일의 점도가 수용성 유제 보다 크기 때문에 칩에 의한 drag-out 손실이 크다.

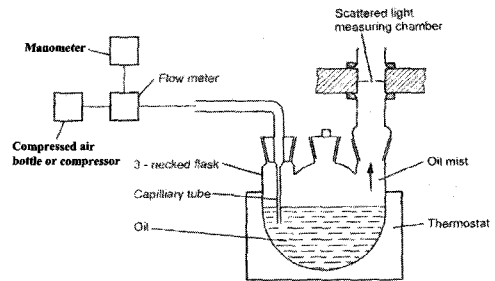


그림 9. 금속가공유의 오일 미스트를 측정하는 장치.

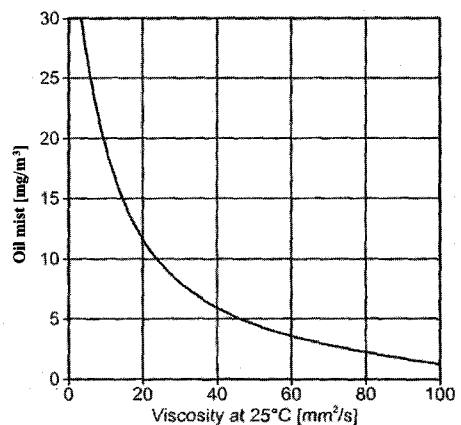
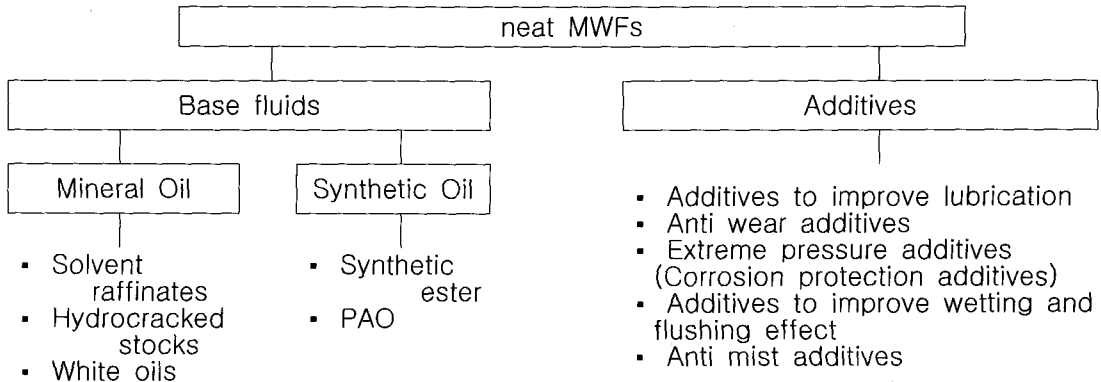


그림 10. 점도에 따른 오일 미스트의 영향.

대부분의 광유계 오일형 금속가공유는 광유계 오일과 윤활성, 방청성, 거품성, 미스팅, 부식방지성, 분산성, 산화 안정성등을

부여하기 위한 첨가제로 구성되어 있으며 요약하면 Table 2와 같다.

Table 2. Composition of neat MWFs.



4-2. 수용성 금속가공유

수용성 금속가공유는 비열이 크고 열전도율이 좋고 증발잠열이 큰 물을 냉각제로 하기 때문에 금속 가공 작업에서 공구 및 피삭재의 냉각, 공구와 피삭재 가공 표면의 welding 방지, 고온에서의 마모방지 및 피삭재의 뒤틀림을 방지하기 위하여 사용한다. 수용성 금속가공유는 광유계 오일형 금속가공유에 비해 방청성능 및 윤활성능이 나쁘기 때문에 방청첨가제나 계면활성제 등과 같은 윤활성 향상제를 첨가하여야 하는데 주요 성분은 다음 Table 3과 같다. 그 중에서 그림 11에서 보는 바와 같이 사용 첨가제 중에서 여러 가지 유효 첨가제를 수중으로 분산시키는 역할을 하는 유화제의 선정은 매우 중요한데 음이온성, 양이온성 및 비이온성의 다양한 유화제가 사용가능하다 (Table 4).

Table 3. The main ingredients of MWFs.

- Mineral oil hydrocarbons
- Synthetic hydrocarbons, synthetic esters, fatty oils
- Emulsifiers
- Corrosion inhibitors
- Stabilizers, coupling agents
- Extreme pressure additives (EP substances)
- Anti-wear additives
- Lubricating film improvers
- Antifoam agents
- Microbiocides
- Complexing agents

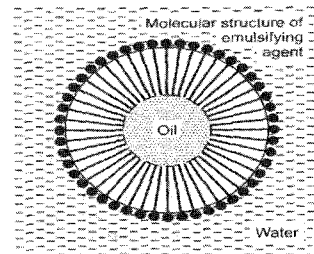
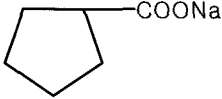
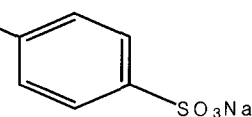
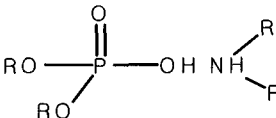
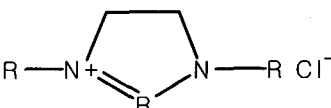
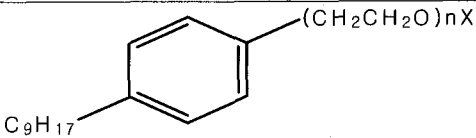
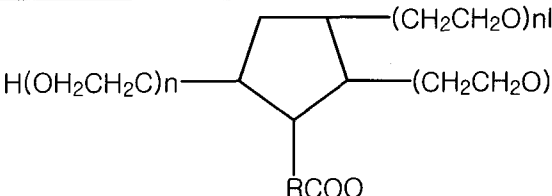


그림 11. OW 에멀전의 계면에서 유화제 분자들의 배열.

Table 4. Chemical structures of ionic emulsifiers.

	Name	Structures
Anionic emulsifier	Sodium soaps	$R - COONa$
	Amine Soaps (triethanolamine soaps)	$R - COONH(CH_2CH_2OH)_3$
	Naphthenic acids	
	Sulfonates (Dodecylbenzenesulfonate)	$R - SO_3Na$ $C_{12}H_{25}$ 
	Sulfates : Sulfated castor oil	$R - OSO_3Na$ $H_3C(H_2C)_5 - \underset{\substack{ \\ OSO_3Na}}{CH} - CH_2CH = CH(CH_2)_7COO$
	Amine salts of phosphoric esters	
Cationic emulsifier	Quaternary ammonium salts :	$R - NH_3^+CH_3COO^-$
	Salts of fatty amine	
	Salts of imidazoline	Cl^-
Non-ionic emulsifiers	Polyethylene oxide chain	$-(CH_2CH_2O)_n-$
	General formula of ethoxylated products	$X - (CH_2-CH_2-O)_nH$
	Ethoxylated phenols : Nonylphenoethoxylates	
	Ethoxylated alcohols	$X = RO$
	Ethoxylated fatty acids	$X = RCOO$
	Ethoxylated fatty amine	$X = RNH$
	Ethoxylated fatty acid amides	$X = RCON$
	Polyols, Ethoxylated sorbitan ester	

수용성 금속가공유에 첨가되는 첨가제 중 또 다른 중요한 첨가제는 부식방지제이다. 주요 부식방지제로는 카르복실산의 알칼리 및 알칸올아민 염, 술포네이트, 나프텐산의 알칼리 및 알칸올아민 염, 아민, 아미드, PTBB 타입 (*p-tert-butyl benzoic acid*), acidic phosphor acid ester의 아민 염, boric acid amide의 붕소화합물, sodium nitrite, 알칼리 카보네이트, 알킬술포아미드 카르복실산, fatty sarkosides, 페녹시 유도체, sodium molybdate 등이다.

사용되는 첨가제의 용해성을 향상하기 위하여 글리콜과 알콜 같은 커플링제를 첨가하여 낮은 온도에서 보관하는 동안 장기 저장성을 향상할 수 있다. 또한, 고농도의 계면활성제를 함유하고 있는 금속가공유는 거품이 문제가 되어 가공성이 나빠지는 문제점이 발생할 수 있기 때문에 실리콘 화합물과 같은 소포제를 첨가한다.

Complexing agents는 고농도의 음이온 계면활성제가 배합된 금속가공유의 경우, 에멀전의 수명을 향상시키거나 칼슘 염등의 형성을 방지할 목적으로 사용된다. 또한, 활성 금속에 의한 금속가공유제의 산화 현상을 금속이온을 불활성화함으로써 방지하는 역할을 한다. 특히, 트리아진과 같은 biocide와 상호작용하여 microbiocide 효과를 나타낸다고 보고된 바 있다. complexing agent로 가장 많이 사용되는 화합물은 ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) 이다.

그림 12에 3가지 형태의 수용성 금속가공유제를 분산 모델을 사용하여 나타내었다. 그림 12에서 타입 1은 약간의 부식방지제를 포함하고 24% 유화제, 약 60%의 광유계 오일을 포함하는 유제로써 유백색의 전형

적인 광유계 에멀전을 나타낸다. 이러한 유제는 유희성이 우수하여 거친 금속가공 작업 시 사용된다. 타입 2는 약 30% 유화제, 20% 광유계 오일이 아주 미세하게 분산되어 있는 소위 semi-synthetic 유제이다. 타입 3은 광유계 오일을 전혀 포함하지 않는 투명한 용액으로 grinding 작업에 사용된다. 고농도의 계면활성제가 사용되기 때문에 거품이 많이 발생하는 문제점이 있다. 또한 거친 금속 가공작업에는 폴리글리콜을 사용하여 유희성을 향상한 금속가공유제가 사용된다.

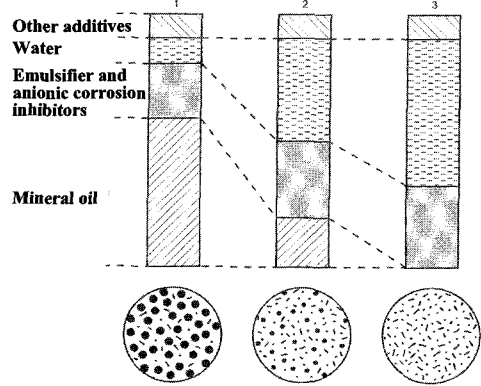


그림 12. Composition of water-miscible coolants containing emulsifiers and their dispersion models. 1, conventional soluble oils; 2, emulsion with low mineral oil content (semi synthetic, micro emulsion); 3, mineral oil-free metal working fluids containing surfactants. The black dots represent the oil droplets, the stars the emulsifier micelles and the lines the molecularly-dissolved surfactants.

5. 수용성 금속가공유의 부패 및 관리

수용성 금속가공유제가 사용되는 상황은 Table 5에 나타난 바와 같이 미생물의 번식조건에 최적이다. 따라서, 수용성 금속가공유를 개발하고 응용하는데 있어서 가장 문제가 되는 것은 미생물에 의한 부패이다.

에멀전은 장기간 순환사용하면 부패 과정의 제1단계인 호기성균이 번식하기 쉽고 휴일 등에는 순환이 정지되어 산소공급이 없어도 혐기적 분위기로 되어 제2단계의 통기 혐기성 세균, 황산 환원균이 번식하여 극도의 부패냄새가 발생한다. 실제적으로 미생물에 의해 유화제, 부식방지제 및 다른 유기 첨가제의 분해는 금속가공유제의 성능을 저하시키는 등 다음과 같이 여러 가지 문제를 유발한다.

- 1) 유화제의 분해로 에멀전의 안정도가 저하된다.
- 2) 산의 생성으로 pH가 낮아지고, 음이온성 유화제의 기능을 저하하여 에멀전의 안정도가 저하된다.
- 3) pH의 저하와 부식방지제의 분해로 방청성능의 문제가 발생한다.
- 4) 불순물의 생성으로 순환장치에 문제가 발생하고 공작 기구에 deposit가 생기고 여과 시스템에 문제가 발생한다.
- 5) metal sulfide 등의 악취가 발생한다.
- 6) 근로자의 위생에 치명적인 영향을 미친다.

Table 5. 수용성 금속가공유의 미생물 번식요인.

발생원	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 희석수 중의 미생물 ▪ 공중 부유의 미생물 ▪ 가공물에 부착된 미생물 ▪ 액 교환전 사용액의 잔존 	
영양원	탄소 공급원	▪ 유제성분, 혼입 윤활유등
	질소 공급원	▪ 유제성분, 가공물 부착 방청유, 희석수 등
	금속	▪ 철삭찌꺼기, 희석수, Fe, Al, Ca, Mg, K, Cu
	무기이온	▪ PO_4^{2-} , SO_4^{2-} , Cl
생육환경	수분	▪ 희석수
	온도	▪ 30°C 전후 (가공열, 순환열)
	pH	▪ 8~10 (약 알카리)

이러한 일련의 현상은 사용유 중에 미생물(박테리아, 곰팡이)이 번식한 결과이며 부패된 사용유 중에는 보통 몇 천만~몇 억/mL의 세균수가 검출되고 있다. 사용유 중에서 검출되는 주요 박테리아는 *E. coli*, *K. pneumoniae*, *P. sp.*, *P. vulgaris*, *P. aeruginosa*, *P. oleovorance*, *S. typhosa*, *S. aureus* 등의 호기성 박테리아가 많은데 이 중에서 *P. oleovorans* 및 *P. aeruginosa* 등은 산소의 존재와 관계없이 번식하는 균이며 완전히 소멸시키는 일은 어렵다. 호기성 박테리아가 번식하여 유제 중의 산소가 적어 지거나 주말의 휴무로 유제의 유통이 정지되어 사용유가 혐기성 상태로 변하면 *D. desulfuricans*와 같은 혐기성 균이 번식하며 이 박테리아는 황산염을 환원시켜 황화수소를 발생시키기 때문에 악취의 원흉이 되고 있다.

부패의 진행 상황은 생균수나 혐기성균수를 측정해서 실험실적으로 추적할 수가 있으나 현장에서는 부패의 진행과 더불어 앞에서 열거한 현상이 나타나게 되므로 사용유의 악취, 외관 변화, pH, 방청성 등을 주의깊게 관찰하고 있으면 부패의 진행을 알 수 있고 부패 방지제나 pH 조절제를 첨가하여 부패의 진행을 정지시키거나 지연시킬 수가 있다. 그러나, 부패를 완전히 방지하기는 곤란하며 부패를 방지하기 위해서는 미생물의 영양원이 되기 쉬운 인, 유황, 유지, 광유등의 성분이 적고 항균성이 있는 유제를 선택함과 동시에 살균 및 정균성이 있는 방부제를 사용하여 미생물의 번식을 억제할 수밖에 없다. 또한, 살균력

이 우수한 방부제는 작업자에게 피부염을 일으킬 염려가 있고, 폐유 처리 과정에서도 회수되지 않는 방부제는 폐유 처리시 미생물을 살균할 우려가 있고 배수되어 어류에 손상을 일으킬 수 있다. 따라서, 작업자에 안전하고 부패의 우려가 없는 금속가공유제의 개발과 더불어 사용유의 청정성 유지 및 적절한 농도관리 등을 통한 철저한 관리로 부패를 방지하여야 한다. 금속 가공유제의 관리 요령은 다음과 같다.

- 1) 신유 충전시 기계 주변과 급유 계내의 이물질들을 완전히 제거하여 충분히 살균하고 세척한 후에 급유한다.
- 2) 희석수는 수돗물 또는 연수를 사용하고, 대장균이나 무기 염분이 많은 지하수는 피한다.
- 3) 유제의 농도를 수시로 체크하여 적절한 농도를 유지한다.
- 4) 사용 중에 pH를 수시로 체크하여 신유의 pH를 유지하도록 한다.
- 5) 휴일 등으로 기계가 장기간 정지할 경우에는 탱크내에 공기를 불어넣어 혐기성 박테리아의 번식을 방지하고 동시에 악취 제거에 힘쓴다.
- 6) 타유의 분리성이 우수한 금속가공유제를 사용하고 타유의 혼입 시에는 제거 장치를 통하여 신속히 제거한다.
- 7) 발생한 침을 효율적으로 제거할 수 있도록하여 탱크 내에 퇴적되지 않도록 한다.
- 8) 부패의 징후가 확인되면 즉시 방부제를

를 첨가하고 정기적으로 처방한다.

6. 결론

이상에서 금속가공유 전반에 대하여 금속가공 과정에 있어서 기계적 메카니즘, 금속가공유의 작용, 금속가공유의 분류, 금속가공유에 포함된 첨가제의 화학적 구조 및 금속가공유제의 부패 및 관리등에 관하여 개략적으로 살펴보았다. 개략적인 내용이지만 여러 가지 금속 가공 작업에 있어서 꼭 필요한 금속가공유제의 중요성을 인식하는 계기가 되었으면 하는 것과 철저한 관리로 작업 환경의 청정성과 금속가공유제의 인체에 대한 중요성을 다시 한번 자각하는 계기가 되었으면 하는 바람이다. 또한, 금속가공유를 사용하는 모든 근로자 여러분과 윤활유를 취급하는 모든 윤활 관계자 여러분에게 본 내용이 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

7. 참고자료

- 미국 Mobil 사 기술자료집, "Fluids for Metal Removal".
- E. O. Bennet, Lubrication Engineering, 11, 549-555, 1974.
- T. mang, W. Dresel ed., Lubricants and Lubrications, Chap. 14, New York, Wiley-Vch Inc., 2001.
- T. Kazuyoshi, Tribologist, 42, 7, 552-557, 1997.
- M. Greeley, N. Rajagopalan, Tribology International, 37, 327-332, 2004.