

윤활시스템에서 극압첨가제 조성에 따른 마모특성 연구

김용석[†] · 류재환

(주)삼화유업 기술연구소

A Study on the Wear Properties by EP(Extreme Pressure) Additive Composition in a Lubricated Concentrated Contact

Yong-Seok Kim[†] and Jae-Hwan Ryu

Research and Development Center, SAMHWA LUBE OIL CO., LTD.

Abstract – This research for replacement of chlorine or sulfur based EP(extreme pressure) -additives which is restricted materials by environmental regulation. The subject of this study is as follows, 4-ball test and friction coefficient test were experimented in accordance with temperature and velocity, compounding with several organic or inorganic metallic elements. After 4-ball test, wear area of steel ball was analysed by SEM-EDX. As the analysis, organic and inorganic elements make a effect for extreme pressure lubricity. It is shown that the friction coefficient of lubricant which includes chlorine or sulfur additives, the scoring phenomenon is found according to temperature and the scuffing phenomenon at 200°C. Applying to Na, P, S, Zn, Ca based on inorganic and organic elements, the result showed that friction coefficient is decreased more and more, as increasing temperature of lubricant. The additive based on S, Cl, P elements is effect for extreme pressure in the sample#1 and Na, P, S, Zn, Ca in sample #2. These elements are environmental contaminants and S, Cl based on EP additives which are very popular in domestic industry, when they are properly composed with non-chlorine based on additives and Na, P, S, Zn, Ca organic or inorganic elements. It is showed that lubricity and excellent anti-wear properties.

Key words – environmental regulation, organic or inorganic metallic elements, EP (extreme pressure) additives.

1. 서 론

최근 들어 산업 활동의 급속한 발전은 철강, 자동차, 조선, 발전, 중장비 등 산업에서 각종 소재 가공에 사용되는 금속가공유 역할에 대한 중요성을 크게 인식시키고 있다. 여기에 소재를 가공하는 각종 기계가 고성능화, 고정밀화 되면서 소재 가공시 사용되는 금속가공유 요구특성이 다양해지고 환경과 안전에 대한 법적규제가 강화되고 있다. 그러나 아직까지도 국내에서는 금속가공유에 대한 급속한 환경변화에도 불구하고 환경변화에 대응하는 금속가공유 첨가제의 연구 개발 실적이나 적용 실적이 전무한 상태이며 현재까지도 고속, 고압, 고온의 절삭영역에서 윤활성을 발휘하기 위하여 염

소, 황, 인계 극압제가 많이 사용되고 있다. 이러한 원인으로서는 아직까지도 국내 가공기계의 가공속도가 저속인 것과 금속가공유의 비용측면에서 첨가제 대체로 인한 금속가공유의 비용증가라 여겨지며 염소, 황계 극압제를 대체하여 사용할 수 있는 첨가제에 대한 연구 실적이 미비하고 대체 첨가제에 대한 윤활영역 해석이 어려운 것에 기인 한 것으로 여겨진다.

현재까지도 염소, 황, 인계 극압 첨가제는 경계윤활(Boundary Lubrication), 혼합윤활(Mixed Lubrication), 극압윤활(Extreme Pressure Lubrication)하에서 Surface Failure를 방지하기 위해서 상업적으로 금속가공유에 많이 사용되고 있다.

그러나 21세기의 산업 미래는 환경에 대한 규제가 점점 강화 되고 있으며 폐 비수용성 금속가공유 폐기 시에는 대부분 연소를 통해서 처리하고 연소 처리시 염

[†]주저자 · 책임저자 : kys1253@chollian.net

소계 극압제는 염산(HCl), 황계 극압제는 이산화황(SO₂)으로 변환되어 대기 오염 방지법의 규제 물질인 “황산화물”, “유해물질”의 발생원이 된다[1,2].

현재 절삭유제 KS 규격에 있어서는 염소분 과 전유황분의 상한 값을 설정하여 연소 처리할 경우 환경오염을 조금이라도 방지하려는 시도가 이루어지고 있다. 특히, 염소계 극압제의 염소 성분은 절삭가공 중 열에 의한 염소의 해리와 가수분해에 의해 발생되거나 연소시 발생하는 염소가스로 인해 오존층 파괴는 물론 산성비의 원인이 되며 강한 부식성을 가지고 있다.

또한, 인체안전성 면에서 염소화합물은 염소 좌창의 원인이 될 수 있다는 외국의 보고도 있다

이러한 환경적인 원인으로 이미 선진국에서는 염소 및 황계 극압제를 대체하는 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구는 윤활시스템에서 극압(Extreme pressure)첨가제가 일정한 조건에서 Scuffing Wear로부터 Surface Failure 특성을 실험실적으로 규명하여 첨가제의 사용 한계를 규명하는데 그 목적이 있다.

윤활시스템에서의 마모는 상대적인 운동을 하는 두 물체 사이에서 표면상태(Surface topography), 접촉조건 및 분위기 등의 채요소들에 의해 발생되며 형태학적으로 Scuffing, Scoring, Pitting 및 Fretting 등으로 분류되고 윤활조건의 특성에 따라서 미끄럼접촉(Sliding Contact)에서는 Mild Wear, Severe Wear로 구분되며, 이들은 서로 다른 Wear Process를 지닌다. 즉, Mild Wear 영역에서는 낮은 마모율, smooth surface 및 산화물로 구성되어 있는 마모입자들이 생성되는 반면, Severe Wear 영역에서는 높은 마모율, Coarse 혹은 Disturb 된 표면의 형성 및 급속마모입자들이 존재한다 [3].

Mild Wear와 Severe Wear의 마모생성기구의 차이는 접촉상대속도, 하중 및 표면조도 등의 정도에 기인된다. Mild Wear영역에서 Severe Wear영역으로 전이될 때의 가혹한 조건에서 생성되는 마모현상을 Scuffing Wear라하며, 이는 접촉면에서의 표면돌기 (Asperities)의

직접접촉에 의한 Cold Welding 현상 (Adhesive Wear)의 유발에 의한 윤활 피막의 파괴와 동시에 기인된 Localized Damage[4], 즉 Local Welds의 특성을 지닌 Surface Failure 형태로 정의된다[5].

Sakurai의 연구 결과에 의하면 극압보호피막 형성속도는 Diffusion Mechanism에 의해 Parabolic law에 의존하며, 극압첨가제들에 의해 형성된 극압막의 Load Carrying Capacity는 Phosphide > Phosphate > Sulfide > Chloride의 순이며, 내마모성은 Sulfide > Phosphate > Phosphide라는 결과를 얻었다[6,7]. Hot Wire Method를 이용하여 부식된 Wire 성분의 X선 회절분석 결과 황 화합물인 경우 FeS, FeS₂의 생성, 염소화합물은 FeCl₂·4H₂O의 반응물이 생성, 인 화합물의 경우는 Fe·Fe(PO₄)₃(OH)₃, Fe(PO₄)₂ 및 FePO₄의 혼합물구조를 형성한다는 것을 관찰하였다.

본 논문에서는 진자식 마찰시험기와 4-ball(soda type) 마찰 시험기를 이용하여 상업적으로 사용되는 염소, 황, 인계 첨가제를 사용한 윤활유 Sample#1과 염소계 극압제를 대체한 Sample #2를 온도에 따른 마찰특성과 속도에 따른 마모 특성을 고찰하여 첨가제가 마모에 미치는 영향을 밝히고 환경, 보건, 안전에 영향을 미치고 있는 염소계 첨가제를 대체 하였을 때 마찰과 마모에 미치는 영향을 검토 규명하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치

본 실험에서는 첨가제별 온도에 따른 마찰 특성을 파악하기 위해 Fig. 1과 같은 진자식 마찰시험기를 이용하였으며 사용된 Ball은 JIS-B1501에서 규정하는 고탄소 크롬 베어링강 강재이고, 이에 대한 물리, 화학적 성질의 분석치는 Table 1과 같다.

속도에 따른 극압 윤활 특성을 파악하기 위해 Fig. 2과 같은 소다식 4구형 극압윤활시험기를 이용하였으며 사용된 Ball은 JIS-B1501에서 규정하는 고탄소 크

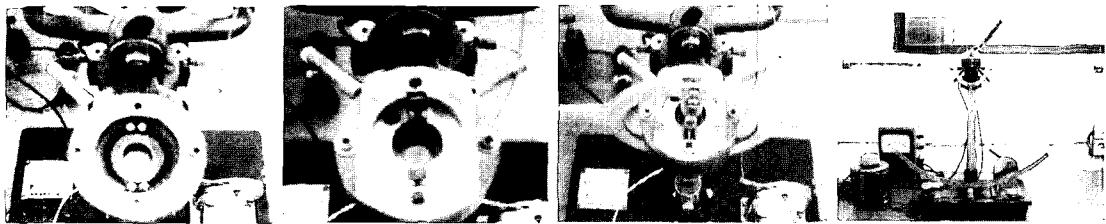


Fig. 1. Schematic diagram of friction coefficient test machine.

Table 1. Physical and Chemical properties of steel ball and steel pin

Steel Ball		Steel Pin	
Dia (mm)	4.76 (3/16")	ϕ	$2 \pm 0.012 \times 30$ mm
Hardness (HRc)	62~67	Hardness (HRc)	60~66
Surface Roughness (Ra, μ m)	0.08	Surface Roughness (Ra, μ m)	0.08
Material	JIS-B1501	Material	SUJ 2 (JIS G 4805)
		Chemical composition (wt%)	C : 0.95~1.10 Si : 0.15~0.35 Mn : Under 0.05 P : Under 0.25 S : Under 0.025 Cr : 1.03~1.60

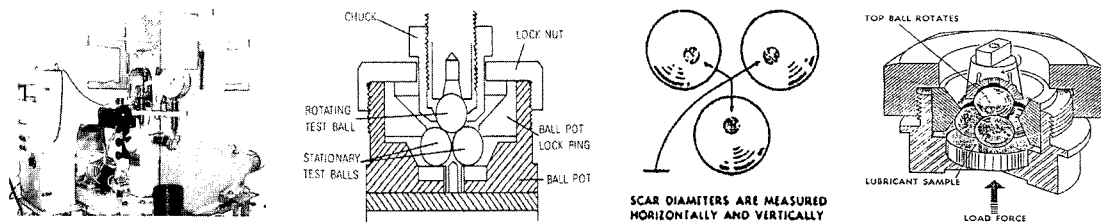


Fig. 2. Schematic diagram of 4-ball test machine.

Table 2. Physical and Chemical properties of steel ball

Properties	Steel Ball
Dia (mm)	19.05 (3/4")
Hardness (HRc)	62~67
Surface Roughness (Ra, μ m)	0.08
Material	JIS-B1501

정하였으며 4-Ball 시험후의 시료를 채취하여 금속마모량 측정과 마찰면에 형성된 피막을 EDX(Energy Disperse X-ray Spectrometer)로 분석하였다. 4-Ball 시험후의 시료의 성분 변화를 분석하기 위해 FT-IR (Fourier Transform Infrared Nicolet 520P USA, KBr Disc Sealed cell 0.1 mm)을 사용하여 극압첨가제의 증감을 분석하였다.

롬 베어링강 강재이고 이에 대한 물리, 화학적 성질의 분석치는 Table 2와 같다.

또한 시험 전, 후 시료의 물성을 파악하기 위해 굴절율, 비중, 동점도, 점도지수, 전산가, 동판부식을 측

2.2. 극압첨가제의 물성

본 연구에서 사용된 첨가제는 중, 고 하중 절삭가공에 산업용으로 많이 사용되는 황,염소,인계 극압제를 사용하였으며 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Properties of EP additive

	Di-tertiary alkyl polysulfides	Chlorinated paraffine	P-EP Additive	Zinc-alkyl dithio phosphate
Chemical structure	R-SH, R-Sx-R	CH ₃ (CH ₂) _n CH ₃ (C ₁₄₋₁₇)	(O)P(OC ₆ H ₄ CH ₃) ₃	$\left[\begin{array}{c} \text{R-O} \diagup \text{P} \diagdown \text{S} \\ \text{R-O} \diagdown \text{P} \diagup \text{S} \end{array} \right]_2 \text{Zn}^{2+}$
Sulfur content (% weight)	29.65	-	-	14.8
Chlorine content (% weight)	-	51	-	-
Phosphorus content (% weight)	-	-	8.4	7.45
Zinc content (% weight)	-	-	-	9.0
Molecular weight (g/mol)	434	420	368	-
Viscosity at 40°C	53	300	-	-
Pour point	-	-15	-	-

Table 4. Properties of base oil

Base Oil	Test Method	I	II	
Kinematic Viscosity mm ² /sec (cSt)	ASTM D-445	6.8	29.50	
Specific Gravity 15/4 °C	ASTM D-1298	0.860	0.864	
Flash point °C	ASTM D-93	142	218	
Viscosity Index	ASTM D-2270	92	103	
Pour Point °C	ASTM D-97	-35	-15	
Hydrocarbon Type %	ASTM D-2140	Ca	8.7	2.5
		Cn	40.7	32.5
		Cp	50.6	65
Copper Corrosive Test 100°C/1 hrs	ASTM D-130	1a	1a	

Table 5. Result of analysis of organic and inorganic elements in sample #1,#2

Ingredient (wt%)	Sample #1	Sample #2
Base oil (I + II)	77.5	77.5
Fatty oil Content	10	10
Sulfur Content	2.5	0.74
Chlorine Content	3	-
Phosphorus Content	0.15	0.37
Additive 1 Content	-	0.17
Additive 2 Content	-	0.5
Zn Content	-	0.45

Table 6. Properties of solid lubrication film to additive

고체윤활막	융점 (°C)	전단강도 (%)	결정구조
Fe	1525	100	
FeS	1193	50	
Fe(15%)+FeS(85%)	985	-	
FeCl ₂	682	20	층상구조
FeCl ₃	302	-	층상구조

여기에 기유는 상업적인 파라핀계 광유로서 동점도 조절을 위해 2종류를 선택하였으며, 물성을 Table 4에 나타내었다.

Table 5에는 본 연구에 사용된 시료의 화학적 조성을 나타내었으며 Sample #1은 현재 범용으로 사용되는 중·고 하중 절삭유의 화학적 조성으로 제조하였고 Sample #2는 Sample#1과 동점도와 지방유분의 함유량을 같게 하고 염소계 극압제를 대체 실험을 위해 첨가제를 변환시킴으로써, 속도, 온도, 화학적 첨가제가 마모에 미치는 영향을 고찰하였다. Table 6에서는 염소, 황계 극압제에 의한 고체 윤활막의 성질을 나타내었다.

2.3. 실험 조건 및 실험 방법

본 연구의 실험은 4-ball 시험기를 통해 속도를 500 rpm, 750 rpm, 1000 rpm에서 각각 표면손상에 따른 스커핑(Scuffing)이 발생하여 파괴(failure)에 이르기까지 일정하중을 단계적으로 증진 시켜 운전을 하여 일정한 마찰 조건 아래에서 운동했을 때 미끄럼마찰 접촉면에 녹아 붙음 등 그 밖의 손상을 일으키지 않고 윤활유로 인해 얻어지는 최대 하중 또는 최대 압력을 나타내는 내하중성을 시험 하였으며 4-ball 시험후 의 마모상태를 SEM-EDX로 분석하여 시작온도 40°C에서 속도에 따른 마모 특성과 마찰면에 형성된 피막을 분석하여 극압윤활 피막상태를 분석하였다.

온도에 따른 마찰특성은 시료의 유온을 50°C, 100°C, 150°C, 200°C로 승온 시키면서 진자식 마찰 시험기를 통해 온도에 따른 마찰계수를 산출하여 윤활 상태를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 속도별 극압 윤활성 실험결과

Fig. 3에서는 시료의 온도를 40°C로 하고 4-ball 시험기의 회전속도를 500, 750, 1000 rpm으로 증진하여 시험 한 내하중성 결과를 나타내었다.

시험한 결과 sample #1과 sample #2 모두 750 rpm에서 가장 낮은 내하중성을 나타냈으며 500, 1000 rpm에서는 같은 수치의 내하중성을 나타냈다.

실험 후 마모 시험강구의 마모 면적은 Table 7과 같으며 두 시료 모두 속도의 증가에 의해 마모 면적이 증가하였으며 Fig. 4에 나타냈다. sample #1과 sample #2 비교시 sample #2가 마모 면적이 훨씬 작은 결과

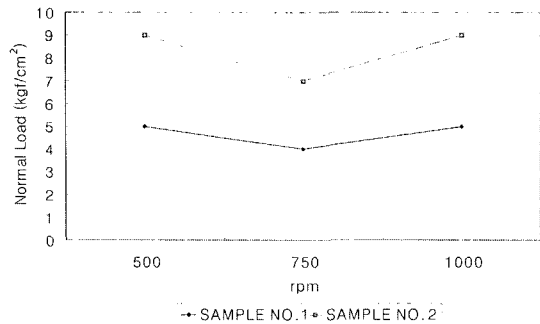


Fig. 3. Transition of EP lubricated characteristics by rotation speed.

Table 7. Measure result of scar wear area (unit:mm²)

rpm	Sample #1	Sample #2
500	3.80	1.54
750	4.80	1.70
1000	7.30	2.19

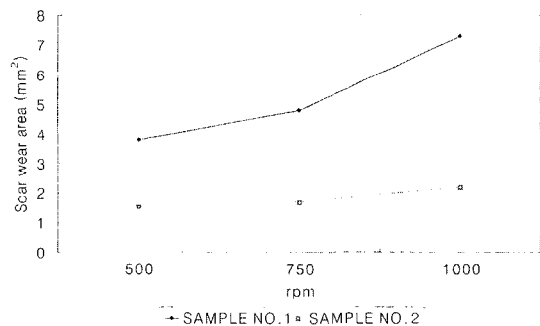


Fig. 4. Transition of scar wear area by rotation speed.

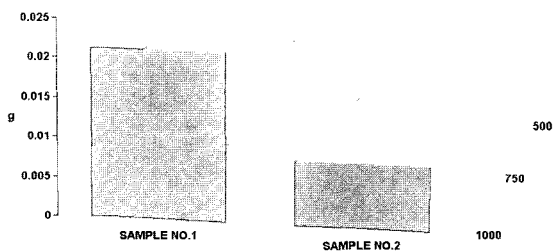


Fig. 5. Measure result of chip weight.

를 나타냈으며 마모증가율은 sample #1에 비해 sample #2는 750 rpm에서는 16%, 1000 rpm에서는 18.6% 증가하였다.

Fig. 5는 4-ball 시험기의 회전속도를 500, 750, 1000 rpm으로 증진 후 시험기에 발생된 chip양을 solvent로 깨끗이 세척후 filtering 하여 발생된 chip양

Table 8. Result of Total Load and Normal Load per unit Ball and Maximum pressure of oil film

No.	rpm	Total Load P(kg)	Normal Load per Unit Ball W(kg)	Maximum pressure of oil film a max (kg/mm ²)
Sample#1	500	343.4	99.5	485
	750	192.4	78.2	448
	1000	343.4	99.5	485
Sample#2	500	443.6	181.5	594
	750	343.4	140	545
	1000	443.6	181.5	594

의 무게를 측정하였다. sample #1에 비해 sample #2가 훨씬 적게 발생되었으며 마모면적 결과와 동일한 결과를 보여주었다.

Table 8은 4-ball 시험기를 통해 속도를 500 rpm, 750 rpm, 1000 rpm에서 각각 표면손상에 따른 스캐핑(Scuffing)이 발생하여 파괴(failure)에 이르기까지 일정 하중을 단계적으로 증진시켜 4-ball에 미치는 Total Load와 단위구당 하중과 Oil Film 최대압력을 계산한 결과로 계산식은 식(1), (2), (3)과 같으며 sample #2가 훨씬 높은 하중과 높은 Oil Film 압력에서 윤활상태를 유지하였다. Fig. 6는 Total Load와 Normal Load per Unit Ball, Maximum pressure of oil film를 계산한 식을 나타내었다.

3-2. 온도별 마찰계수 실험결과

Fig. 7는 시료의 유온을 25, 50, 75, 100, 150, 200°C로 온도별 승온하면서 마찰계수를 실험한 결과 Sample #1은 25°C에서 150°C까지는 점진적인 마찰계수의 증가를 나타내는 scoring 현상이 나타나고 이 과정에서 마찰 초기에 생성된 피막인 첨가제에 의한 영향을 많이 받은 것으로 200°C에서는 급격한 마찰계수가 증가하는 scuffing 현상과 같은 현상이 발생하였다. 윤활유 첨가제중 특히 염소계의 첨가제가 열에 의해 분해된 것으로 여겨진다. 염소계 유기화합물은 180°C 부근에서 금속과 반응 하며 쉽게 가수분해되고 염소 해리에 의해 금속에 발청과 위해성을 발휘한다 [8]. 반면 Sample #2는 온도가 승온 되면서 마찰계수 감소를 나타내고 있다. 이 결과는 sample #2에 사용된 첨가제는 200°C까지는 가수분해나 원소의 해리 없이 열에 안정하여 마찰특성을 우수하게 한 것으로 여겨진다.

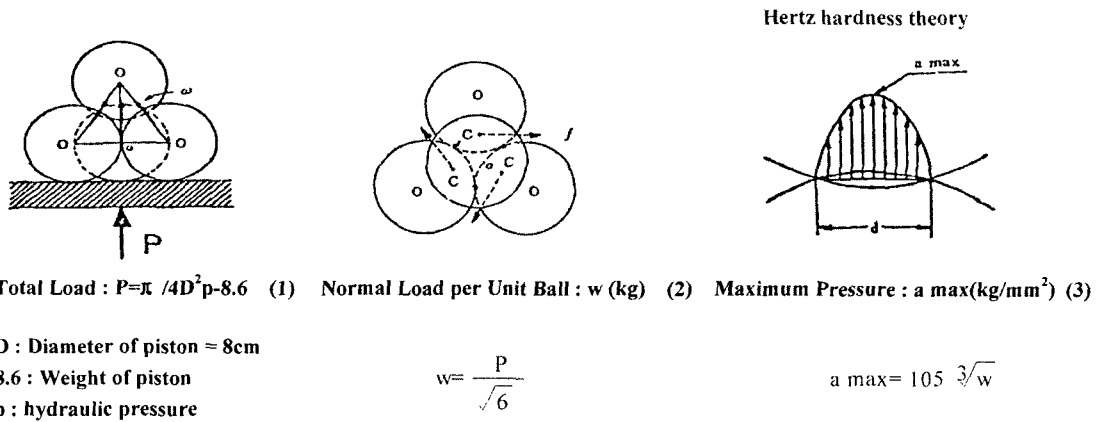


Fig. 6. Total Load and Normal Load per Unit Ball and Maximum Pressure by 4-ball.

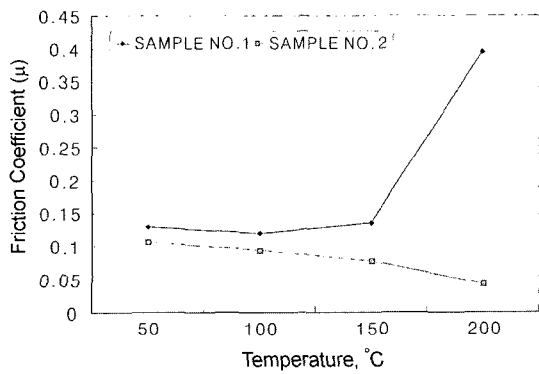


Fig. 7. Transition of friction coefficient by temperature.

3-3. 4-ball 실험 후 시료유 물리 화학적 특성변화

Table 9에서는 4-ball 실험 후 시료유 sample #1, #2에 대한 물리 화학적 특성 변화를 분석한 결과로 모두 속도가 증가하면서 전산가의 증가를 나타냈다. 본 실험에서는 4-ball 시험기를 통해 속도를 500 rpm, 750 rpm, 1000 rpm에서 각각 표면손상에 따른 스커피핑(Scuffing)이 발생하여 파괴(failure)에 이르러 시험기가 자동으로 정지되기까지 일정하중을 단계적으로 증진 시키면서 운전을 하여 sample #1은 9분에서 11분 동안 속도별로 시험 하였고 sample #2는 15분에서 19분 동안 속도별로 시험 되었을 때 sample #1, #2 모두 전산가의 증가로 약간의 산화반응이 진행된 것으로 여겨진다. 이것은 금속과 금속의 접촉면에서 발생하는 고열과 압력 때문에 상대적으로 접촉면의 온도가 200°C 이하에서 효과가 있다고 알려진 지방유, ester 등이 200°C 이상의 고온이 되는 경우에는 금속면에 흡착된 극성기가 탈착하여 첨가제의 효과가 없어지면서 탈착된 극성기가 전산가의 증가에 기여 한 것으로

Table 9. Physical and Chemical Properties of after 4-ball test

ITEM	Sample #1	Sample #2
TAN (mgKOH/g)	Before test	2.14
	500	2.23
	750	2.33
	1000	2.54
Kinematic Viscosity (40°C, cSt)	Before test	30.10
	500	30.07
	750	30.05
	1000	29.98
Viscosity Index	Before test	131
	500	129
	750	129
	1000	129
Refractive Index (RI, 20°C)	Before test	1.4724
	500	1.4724
	750	1.4723
	1000	1.4723
Copper Corrosion (100°C/1 hr)	Before test	3a
	500	3a
	750	3a
	1000	3a

여겨진다.

동점도, 점도지수는 두 시료 모두 약간씩 감소하는 경향을 보였으며 이것은 시험시 전단에 의한 고분자성 물질이 약간씩 전단된 것으로 여겨진다. 반면, 굴절율, 동판부식의 변화는 거의 없었다.

Fig. 8은 4-ball 실험후 시료유에 대한 화학적 성질의 변화 경향을 분광분석에 의한 스펙트럼 변화 경향

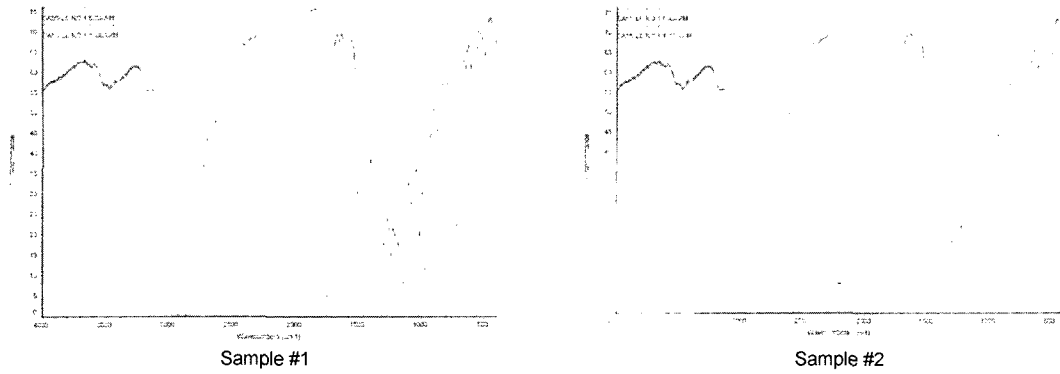
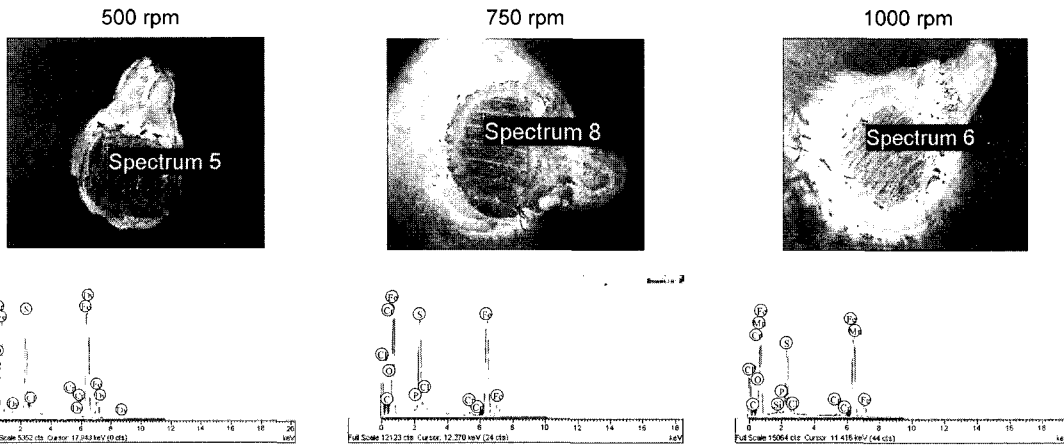


Fig. 8. Infrared spectra of 4-ball analysis identification.

Sample #1



Sample #2

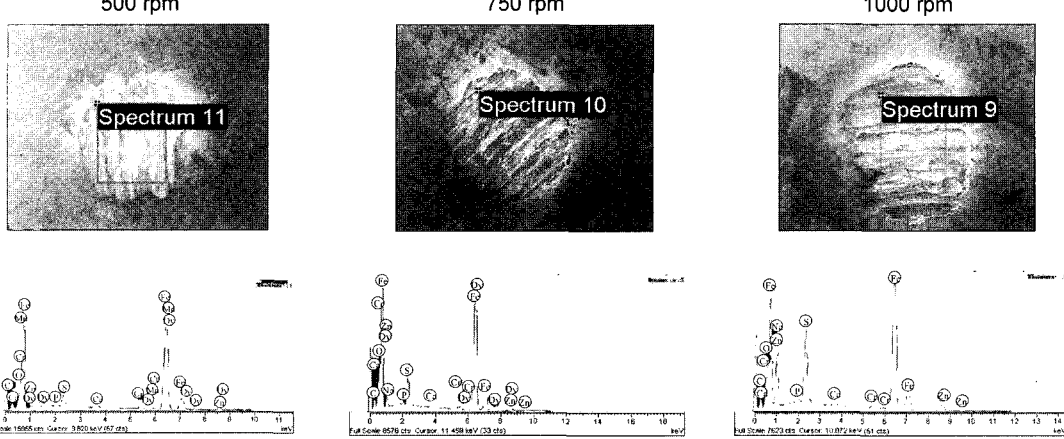


Fig. 9. SEM-EDX photographs of worn surface.

을 나타내고 있으며 사용유의 화학적 물성은 sample #1, #2 모두 전산가의 증가에도 불구하고 성분상 변화

가 없음을 보여주고 있다. 이것은 금속면에 흡착된 극성기가 탈착하여 첨가제의 효과가 없어지면서 탈착된

극성기가 전산가의 증가에 기여 한 것으로 여겨지는 성분이 다른 성분에 비해 상대적으로 미비하여 다른 성분의 spectrum에 의해 상쇄된 것으로 여겨진다.

3-4. 4-ball 실험 후 마찰면의 SEM-EDX 분석결과

Fig. 9은 sample #1, #2의 4-ball 시험 후 강구의 마찰면에 형성된 피막을 SEM-EDX 분석하였으며 SEM으로 마모 상태를 분석하였다.

SEM으로 마모 상태 분석 결과 sample #1은 속도가 증가하면서 마모가 중간에서부터 주변으로 넓어지며 마모직경의 크기의 증가가 진행되고 있음을 보여 주고 있으며 sample # 2는 보호피막이 잘 형성되어 마모 진행이 매우 작게 진행되고 있음을 보여 준다.

분석결과 sample #1은 극압윤활에 기여한 첨가제가 S, Cl, P 원소이고 sample #2는 Na, P, S, Zn, Ca이었다.

4. 결 론

본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 염소계와 황계 극압제로 조성된 범용의 절삭유 Type인 sample #1은 윤활유의 온도가 증가할수록 scoring 현상이 발생하고 200°C에서는 scuffing 현상이 발생하여 급격한 마찰계수의 증가를 가져와 소음 과 진동이 수반되며 기계 운전 동력비의 증가나, 급격한 공구 마모를 일으킬 수 있는 온도임을 예상 할 수 있다. 반면 sample #2처럼 상업화 되어있는 염소나 황계 극압제를 사용하지 않고 Na, P, S, Zn, Ca 형태의 유·무기 원소를 이용한 극압제를 사용하였을 때는 윤활유의 온도 200°C까지는 온도가 높아질수록 마찰계수가 점점 낮아지는 결과를 나타냈다.

2. Sample #1, #2의 4-ball (극압윤활성) 시험 후 강구의 마찰면에 형성된 피막을 SEM-EDX로 분석한 결과 sample #1은 마찰면 피막형성에 기여한 첨가제가 S, Cl, P 원소이고 sample #2는 Na, P, S, Zn, Ca이었다.

SEM으로 마모 상태 분석 결과 sample #1은 속도가 증가하면서 마모가 중간에서부터 주변으로 넓어지며 마모직경의 크기의 증가가 진행되고 있음을 보여 주고 있으며 sample # 2는 보호피막이 잘 형성되어 마

모 진행이 매우 작게 진행되고 있었다.

이것은 환경오염물질이며 국내에서 가장 많이 사용되는 S, Cl, P계의 극압제를 무염소계나 Na, P, S, Zn, Ca의 적절한 조성을 하였을 때 더 우수한 내 마모 윤활 특성을 나타냈다.

3. 윤활유의 유온을 40°C로 하고 4-ball 시험기의 회전속도를 500, 750, 1000 rpm으로 증진하여 극압윤활 형태를 비교하여 본 결과를 나타내었다. sample #1과 sample #2 모두 750 rpm에서 가장 낮은 내하중성을 나타내며 500, 1000 rpm에서는 같은 수치의 내하중성을 나타냈다.

4. 4-ball 실험 후 마모 시험강구의 마모 면적은 속도의 증가에 의해 마모 면적의 증가를 나타냈다. sample #1과 sample #2를 비교시 sample #2가 마모 면적이 훨씬 작은 결과를 나타냈다.

이 결과는 현장에서 실제 절삭 작업시 절삭속도가 증가하면서 sample #1, #2 모두 절삭부하를 받지만 그 정도가 sample #2는 sample #1에 비해 마모 증가율이 750 rpm에서는 16%, 1000 rpm 18.6% 밖에 증가하지 않는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 박상도외 1인, "폐윤활유 처리기술," 윤활유훈회보, pp.9-17. 1990.
2. 韓國油化試驗檢査所, "切削유제와 研削유제," pp.250-254. 1988.
3. 최웅수, "윤활시스템에서 마모메카니즘에 미치는 물리화학적 영향에 관한 연구," 고려대학교 박사학위 논문, 1987.
4. J.F Archard and W. Hirst., A 236, pp.397-410, Proc. Roy. Soc. London, 1956.
5. Research Group on Wear of Engineering Material, "Friction Wear and Lubrication Terms and Definition Organization for Economic Cooperation and Development," 1968.
6. "Conference on Lubrication and Wear," oct. pp.4, Proc. Inst. Mech. Eng., London, 1957.
7. F.T. Barcroft, "Wear," Vol.3, pp.440-453, 1960.
8. T. Sakuri and K. Sato, Trans. ASLE., Vol.9, pp.77-87, 1966.
9. Dieter Klamann, "Lubricants and Related Products : synthesis, properties, applications, international standards," pp.177-356. Deerfield Beach, Floride, 1983.