

자성유체 운활제의 개발 동향

김영규 · 심우전* · 김청균**

한국가스안전공사

*국방과학연구소

**홍익대학교 기계공학과

1. 자성유체(Magnetic fluids)

자성유체는 자연에서 추출한 것이 아니라 자화성(Magnetizability)과 유동성(Flowability)을 동시에 갖도록 합성한 특수액체이다. 자성유체는 1960년대 중반에 미국의 NASA에서 처음 개발된 이후로 윤활, 밀봉, 감쇄, 의료 등의 분야에서 응용연구가 많이 진행되었기 때문에 고도의 정밀도를 요하는 항공·우주산업, 컴퓨터와 반도체 분야 등에서 실용화가 크게 진전되고 있다.

특수물질인 자성유체는 전기적으로 도체인 10nm 정도의 미세한 자기입자(Magnetic particles)에 코팅을 한 후, 이것을 물, 탄화수소, 플루오르카본, 에스터 등의 매개유체(Carrier fluids)에 혼합시켜서 콜로이드 상태로 사용하게 된다. 자성유체는 미세한 자기입자들이 매개유체내에서 서로 충돌하면서 반발력을 발생시켜서 상호간에 늘 콜로이드 상태를 유지하고 있으며, 이 특수유체가 자기장의 영향을 받게 되면 점도가 증가하면서 특이한 성질을 갖게 된다.

자성유체는 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 자기입자 주위에 극성을 갖는 계면 활성제를 부착한 형태를 보여주고 있으며, Fig. 2에서는 자성입자들이 매개유체에서 서로 반발하면서 부유하는 메카니즘을 보여주고 있다. 여기서 자기입자 주위에 확고하게 정착된 대단히 얇은 막(Ultra-thin film)인 안정제(Stabilizer)는 자기입자들이 서로 뭉치지 않고 반발하면서 떨어지게 하는 역할을 한다.

윤활유의 기유(Base oil) 처럼 매개체로 사용된 물질이 액체이기 때문에 상온에서는 고점도의

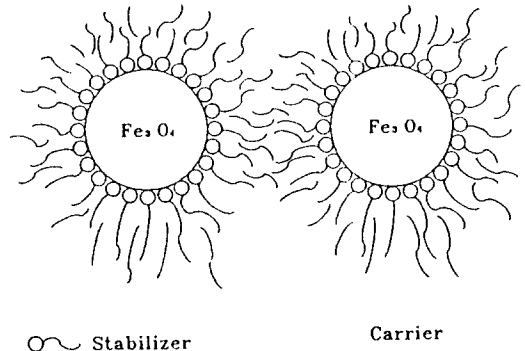


Fig. 1. Magnetofluids.

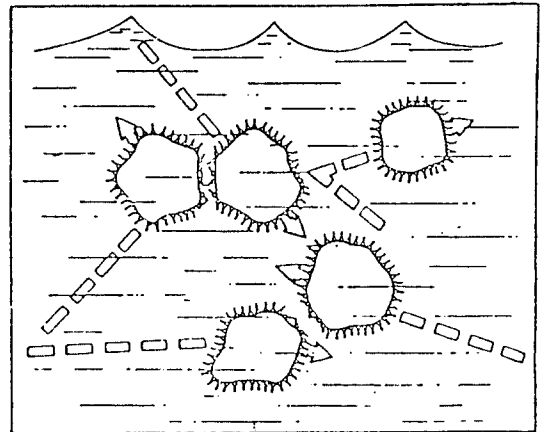


Fig. 2. Agglomeration of particles in a magnetofluid is prevented by a surfactant coating.

액체 특성을 나타내나 자장내에서 운활제로 사용되는 경우는 점성의 증가로 자유로운 유동성을 상실하게 되면서 밀봉성질을 갖게 된다. 이때 사용된 매개유체는 낮은 증발율, 비독성, 내부식성, 특정 매개체에 대한 내수용성이 강해야 응용범위가 커진다.

2. 윤활제(Lubricants)

기계는 반드시 구속된 한정운동을 해야하기 때문에 고체와 고체의 접촉 계면에서는 마찰(Friction)을 경험하게 된다. 기계 시스템에서 중요한 트라이볼로지 기소를 보면 베어링, 시일, 기어 등이 있는데, 이들은 상대 접촉 운동면에서 발생하는 마찰에 의한 에너지 손실과 마멸(Wear)에 의한 기계 수명의 단축내지는 고장을 발생시키는 원인이 되고 있다.

상대 접촉 운동면에서 발생하는 마찰로 인하여 발생하는 문제점을 완화시키기 위하여 윤활제(Lubricants)라는 특수물질을 사용한다. 마찰면에 윤활제를 사용하게 되면 마찰력을 감소시킴으로 인한 에너지 손실의 절감, 고체면의 직접 접촉으로 인한 마멸 발생의 완화, 마찰면에서 발생된 과도한 열의 냉각, 외부로부터 침입하는 이물질의 차단 또는 부식방지, 마찰 운동부에 걸리는 집중하중을 완화시킬 수 있다는 긍정적인 측면이 많다.

현재 윤활제로 개발되어 널리 사용중인 광유계 윤활제나 동·식물계 윤활제는 첨가제 기술의 향상으로 산업체에서 요구하는 윤활성질을 대부분 충족하고는 있으나, 기계의 사용조건과 사용환경이 크게 변화하고 있기 때문에 최근에는 특수 성질이 부가된 합성 윤활제가 개발되어 사용 영역이 크게 확대되고 있는 실정이다.

최근에 개발된 기계의 사용조건은 초고속, 극고압, 초정밀, 극고온, 극저온, 완전밀봉 등과 같이 다양하면서도 동시에 복합적인 기능을 요구하고 있기 때문에 광유계 윤활제에서는 첨가제의 역할이 더욱 중요시 되고 있으며, 또한 새로운 합성 윤활제 개발을 강요 당하고 있다. 그러나 이와 같은 신기술 개발은 기계의 초정밀화와 고속화 추세에서 상대 접촉 운동면의 윤활간극(Lubricating gap)은 더욱 줄어드는 환경이기 때문에 기존의 방법으로는 윤활유를 공급하기가 더욱 어려운 상황이다. 그래서 마찰부에 액체상태의 윤활제 공급보다는 가압한 액체 또는 무화시킨 윤활기체를 공급하는 새로운 윤활공급 방

식을 개발하여 해결하든지 또는 사용하는 접촉 소재의 윤활특성을 강조한 재질을 개발하여 이러한 문제를 해결하고 있다. 소재의 측면에서 윤활 부족문제를 해결하려는 노력의 일환으로 열처리법에 의한 접촉표면의 성질을 변화시킨다든지 또는 이물질을 얇게 접합시키는 코팅(Coating) 기술의 활성화는 경계마찰 등의 구역에서 윤활제 공급부족으로 인하여 발생하는 문제점을 크게 완화시키고 있다.

2-1. 자성유체 윤활제 개발 배경

기계의 정밀도를 향상시키기 위하여 표면의 가공정도를 향상시키는 가공방법, 즉 선반가공 → 연삭가공 → 연마가공 등으로 마찰표면을 매끄럽게 하고, 여기에 윤활제를 공급하여 마찰문제를 해결하고 있다. 이것은 상대 마찰면의 간극을 가능한 근접시켜서 정밀도를 유지하는 방법으로 상대속도를 증가시키기에는 마찰열로 인한 문제점이 더 크게 제기되어 한계를 느끼고 있다.

그래서 상대 접촉 간극을 근접시키지 않고 일정하게 떨어뜨린 상태에서 윤활작용을 수행하기 위하여 새로운 윤활제인 자성유체 윤활제가 개발되었다. 기존의 윤활제는 접촉상태에서 윤활작용을 하나 자성유체 윤활제는 상대 접촉 운동면이 항상 일정한 간극으로 떨어져 있는 상태에서 윤활작용을 한다는 점이 크게 다르다. 이와 같은 윤활방식을 채택하게 되면 접촉 운동면에서 발생하는 마멸이 없고, 이물질의 혼입 우려가 작아서 윤활제의 사용수명이 크게 증가하는 효과가 있다.

윤활제가 상대 접촉간극에서 수행하는 물리적인 윤활작용을 보면, 첫째로 두개의 상대 접촉면에 윤활제가 접촉하여 흡수되고, 두번째로는 상대 접촉면이 근접하면서 윤활제가 접촉압력을 받아서 외부로 유출하도록 강요당하는 현상이다. 여기서 접촉계면에서 점성유체(윤활제)가 외부로 유출되는 것은 상대 접촉면에서 발생하는 접촉압력구배, 가공 정밀도에 따른 마찰면 형상, 접촉면의 경사도 등에 의하여 발생하는 유막의 동압(Hydrodynamic pressure) 때문이다. 이와 같

은 접촉압력에 의하여 기존의 윤활유는 비교적 잘 유출되고, 일단 유출된 윤활제는 작동조건이 변하여도 다시 원위치로 복귀하기가 대단히 어려우나 자성유체는 유출되더라도 작동조건이 원래 상태로 복귀하면 마찰 간극내로 되돌아오는 성질을 갖고 있어서 접촉부의 윤활상태를 늘 향상시키기 유지할 수 있다.

기존의 윤활제는 기유(Base oil)에 첨가제를 넣어서 혼합시킴으로써 윤활특성을 유지시킨 반면에 자성유체 윤활제는 매개유체(Carrier fluids)에 자기입자를 넣어서 콜로이드상의 점도를 유지시킴으로써 윤활유의 성질을 갖도록 한점이 서로 다르다. 자성유체 윤활제에서 사용된 입자는 10nm 이하의 크기로 마찰면에서 발생하는 마멸입자나 외부로부터 침입하는 이물질의 크기보다 대단히 작기 때문에 이것으로 인한 연삭마멸을 기대할 수 없다. 미세한 자기입자는 자성유체의 점도를 증가시키고, 또한 윤활기능을 강화시켜주는 요인으로 작용하고 있다. 매개유체에 혼입된 자기입자는 대단히 작은 간극에서 고체간의 마찰접촉을 방지하는 특성을 갖고 있기 때문에 기존의 윤활제에 비하여 특히 고체간 마찰이나 경계마찰 구역에서 우수한 윤활성질을 나타낸다.

2.2. 터빈용 윤활제

터빈에 사용되는 기존의 윤활제는 광유계 윤활유로 다양하게 개발되어 있다. 그러나 새로운 윤활제인 자성유체유를 개발하여 사용하였을 경우에 어떠한 성질을 보여주나를 알아보기로 한다.

Fig. 3은 터빈유로 개발된 자성유체 윤활제의 점도특성을 보여주고 있다. 이 결과에 의하면 저온에서 자성유체는 비뉴우톤 성질을 나타내나, 온도를 증가시키면 뉴우톤 성질을 나타내는 특성을 보여주고 있다. 이 자성유체 윤활제를 사용하여 기존에 터빈에서 널리 사용되는 광유계 윤활제와 윤활특성을 비교하고자 4-볼 시험기(Four-ball machine)를 사용하여 측정된 실험 결과를 Table 1에서 제시하고 있다.

이들의 실험 결과에 의하면 자성유체의 윤활

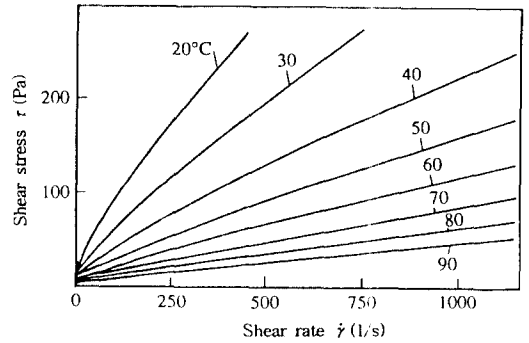


Fig. 3. Rheological curves of a turbine oil-base magnetic fluid with density 1555 (kg/m³) and saturation magnetization $M_s=49.5$ (kA/m).

Table 1. Test results for lubricating properties of the turbine oil-base magnetic fluid

Lubricants	Load(N)	Wear spot mean diameter(mm)
Turbine oil	320	0.38
	400	0.40
	450	1.83
	500	2.03
	560	2.51
	630	2.84
	890	2.64
	1000	2.78
Magnetofluid	400	0.53
	630	0.43
	710	0.65
	790	0.72
	1000	0.9
	1260	1.04
	1410	1.21
	1590	1.37

Lubricating characteristics

- Turbine oil : $P_s=400(N)$; $P_w=1120(N)$; $l_s=13.9$
- Magnetofluid : $P_s=690(N)$; $P_w=1780(N)$; $l_s=46.3$

특성은 광유계 윤활유에 비하여 일반적으로 우수하게 나타났는데, 마멸이 발생하는 초기 하중 값은 약 1.5배 정도 높게 나타났고, 스커핑 계수(Scuffing index)는 3배 정도 높게 나타났다. 여기서 스커핑 계수는 상대 마찰 운동면에서 발생하는 마멸 손상정도를 최소화 시킬 수 있는 능력을 나타내는 지수이다. 이와 같은 실험결과는 장차 광유계 윤활유를 신물질인 자성유체 윤활제로 대체하는 것이 유리함을 알 수는 있으나 대량 생산으로 인한 생산비를 어느 정도로 유지하는나

가 대단히 중요한 문제이다.

3. 윤활 시스템(Lubricating system)

마찰 접촉 운동부에 공급된 자성유체 윤활제가 원활한 윤활작용을 하기 위해서는 특별한 윤활 시스템을 설계해야 하는데, 여기서는 대표적인 베어링과 치차에 응용된 윤활방식에 대하여 알아보기로 한다.

3-1. 베어링(Bearing)

자성유체 윤활방식의 장점은 윤활이 필요한 상대 마찰면에 윤활제를 공급하여 여기에 자기

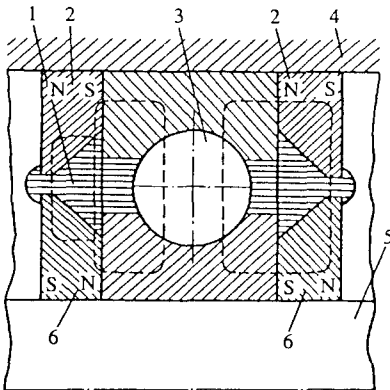


Fig. 4. Schematic diagram of the rolling bearing lubricated by a magnetic fluid. 1-magnetofluid; 2,6-magnets; 3-ball; 4,5-movable and immovable pieces.

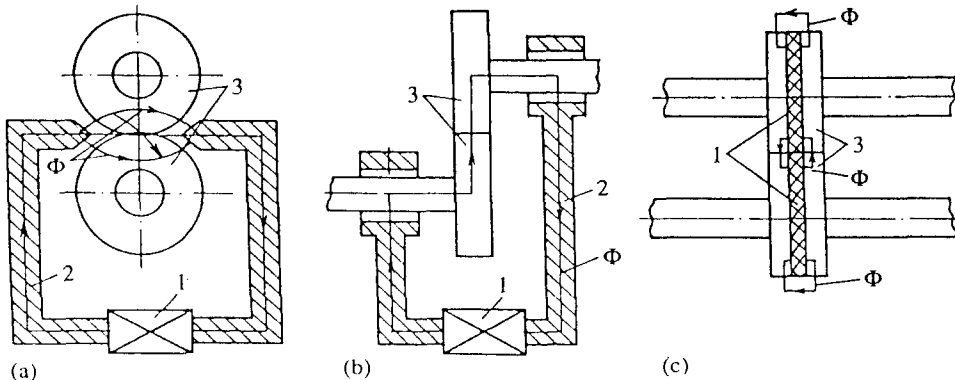


Fig. 5. Different methods used to concentrate a magnetic field in the friction zone. 1-magnetic field source; 2-magnetic pipeline; 3-gearing components; Φ -magnetic flux.

장(Magnetic field)을 형성시켜 자성유체 윤활제가 늘 그 위치에서 윤활작용을 하도록 설계된 점이다.

Fig. 4[1]는 굴름 베어링에 적용한 자성유체 윤활 시스템을 보여주고 있는데, 전동체 주위로 자기장을 형성시켜 자성유체 윤활제가 회전하는 전동체(볼이나 로울러)와 레이스 마찰 접촉면에 부착되어 얇은 유막층을 유지하도록 하는 것이 대단히 중요하다. 윤활제가 마찰표면에 부착되어 유막이 잘 형성되도록 설계하기 위해서는 볼과 레이스 및 자석의 설계가 중요하고, 자기장 세기의 적절한 조절은 자성유체가 마찰 운동면에서 항상 균일한 유막을 형성시킴으로 우수한 윤활작용을 하게 된다. 또한 베어링의 마찰면에 외부로부터 침입하는 이물질에 의한 윤활제 오염을 방지하기 위한 설계도 실시하여 자성유체 윤활제의 수명을 연장시키는 것도 중요하다.

3-2. 치차(Gear)

산업용 기계에서 동력전달 방식으로 가장 많이 사용되고 있는 치차는 상대 접촉면에서 국부적으로 극압을 받고 있으며, 또한 단속적인 운동을 하기 때문에 일반적으로는 고점도의 극압 윤활제를 사용하고 있다. 치차의 접촉 운동면은 작동조건상 주로 탄성유체마찰이나 경계마찰 상태에서 운전되고 있으므로 커다란 마찰열 발생과 마멸이 심하게 발생하고 있다.

이와 같은 작동환경에 자성유체 윤활제를 사용하면 효과적으로 윤활을 할 수 있다는 사실을 알게 된다. Fig. 5[2]는 치차의 마찰 운동면에 적용한 여러가지 윤활 시스템으로 마찰 운동면에 집중적으로 자기장을 형성시키고 이곳에 자성유체 윤활제를 공급하게 되면 마찰 운동시 접촉압력에 의하여 유출되었던 윤활제가 다시 모여들게 되므로 늘 윤활제가 균일한 일정유막을 형성시켜 주기 때문에 마치 충분한 윤활제를 공급하고 있는 효과를 기대할 수 있다.

치차의 마찰 운동면에 부착된 자성유체가 10rps[2]와 같이 저속에서 운전하게 되면 비교적 양호하게 윤활유막이 형성되나 속도를 증가시키게 되면 자성유체 윤활제는 기어의 마찰면으로부터 이탈하는 현상을 보인다. 이것은 Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 균일한 자기장 세기를 강하게 유지시키면 효과적이라 생각되나, 자성유체의 특성상 자기장 세기를 강하게 유지시킨다고 유막압력이 증가만 하는 것이 아니라 임계압력으로 수렴하기 때문에 아직은 문제점을 갖고 있다.

4. 결 언

상대 접촉 운동면이 경계마찰이나 혼합마찰을 하게 되면 윤활상태는 비교적 나쁘다. 이러한 마찰지역에 콜로이드상의 자성유체 윤활제를 공급하면 기존의 윤활제에 비하여 대단히 효과적으로 윤활을 할 수 있게 된다. 그러나 자성유체 윤활제가 마찰부위에 원활하게 공급하기 위해서는 미끄럼 마찰부에서 자기장이 잘 형성시킬 수 있는 도체이어야 하기 때문에 특별한 윤활 시스템 설계가 제시되어야 한다.

자성유체 윤활제는 합성으로 제조된 특수물질로 여러가지 장점을 갖고는 있으나 기존 윤활유와의 적합성, 마찰열, 밀봉압력 등의 조건에서 제한적으로 사용될 수 밖에 없으므로 항공·우주 산업이나 석유·화학 분야와 같이 특수 환경에서만 사용되고, 또한 기존의 광유계 윤활제에 비하여 대단히 고가라는 문제점을 갖고 있다. 그러나 윤활 마찰면의 다양화와 가혹한 사용조건은 자성유체 윤활제의 연구개발 필요성을 크게 증대시키고 있다.

참 고 문 헌

1. Avramchuk, A. Z., Mikhalev, Y. O., Orlov, D. V., et al., Bearing Assembly, Author's Certificate Int. Cl. F16 C33/72, Bull. Inven, No. 12, 1981.
2. Mikhalev, Y. O., Zemlyakov, A. I. and Lapochkin, A. I., Book of Abstracts, 12th Riga Conf. on Magnetic Hydrodynamics Vol. 4, Inst. Phys. Press, Salaspils, pp.55-58, 1984.
3. Nagaya, K., Takeda, S., Sato, A., Ikai, S., Sekiguchi, H. and Saito, N., "Thrust Bearing using a Magnetic Fluid Lubricant Under Magnetic Fields", Tribology International, Vol. 26, No. 1, pp.11-15, 1993.
4. Fertman, V. E., "Heat Dissipation in High-Speed Magnetic Fluid Shaft Seal", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 16, No. 2, pp.352-357, 1980.
5. Perry, M. P. and Jones, T. B., "Dynamic Loading of a Single-Stage Ferromagnetic Liquid Seal", J. Appl. Phys., Vol. 49, No. 4, pp.2334-2338, 1978.