

합성마그네타이트를 이용한 유상자성유체의 제조 및 분산특성

조명호* · 김 만** · 민동준 · 오재현

연세대학교 금속공학과

*삼성종합기술원 광미디어연구실

**(주)고합 신소재팀

(1996년 4월 29일 접수)

Preparation and Dispersion Characteristics of Oil-based Magnetic Fluids with Synthesized Magnetite

Myeong-Ho Cho*, Mahn Kim**, Dong-Joon Min and Jae-Hyun Oh

Dept. of Metallurgical Eng., Yonsei Univ.

*Optical Storage Media Lab., Samsung Adv. Inst. of Tech

**Material Processing Team, KOHAP LTD.

(Received April 29, 1996)

요 약

습식법으로 자성유체용 초미립 마그네타이트를 합성한 후, 이들 표면에 계면활성제로 흡착층을 형성시켜 mineral oil과 kerosene중에 안정하게 분산된 유상자성유체를 제조하였다. Mineral oil에 분산시킨 유상자성유체의 분산율은 합성마그네타이트 20 g에 대해서 sodium oleate 첨가량 2.63×10^{-2} mol, aliquat 336 첨가량 6.56×10^{-3} mol 이상에서 우수한 분산특성을 보였다. Mineral oil에 분산시킨 유상자성유체는 cationic type인 aliquat 336을 제2계면활성제로 사용한 경우 90% 이상의 우수한 분산율을 나타내었으나, anionic type인 monomethyl phosphate를 사용시에는 17%의 낮은 분산율을 나타내었다. 제1계면활성제와 제2계면활성제를 각각 sodium oleate와 aliquat 336으로 고정한 상태에서 분산매를 변화시킨 결과, mineral oil과 kerosene중에는 안정하게 분산되었으나 진공펌프로일체에서는 낮은 분산특성을 나타내었다.

ABSTRACT

The oil-based magnetic fluids were prepared with synthesized ultrafine magnetite by allowing surfactants such as sodium oleate and aliquat 336 to adsorb on the surface of magnetite particles. The dispersion ratio of oil-based magnetic fluids was higher than 90% when the amount of sodium oleate and aliquat 336 were more than 2.63×10^{-2} mol and 6.56×10^{-3} mol for 20 g of magnetite, respectively. The dispersion ratio of oil-based magnetic fluids with the amount of secondary surfactant addition was higher than 90%, when oil-based magnetic fluids were prepared with aliquat 336 of cationic type. However, oil-based magnetic fluids prepared with surfactants of anionic and nonionic type showed lower dispersion than those with cationic surfactants.

Key words: *Magnetic fluid, Ferro-fluid, Magnetite, Dispersion, Colloid*

1. 서 론

최근 하드디스크의 회전축 실링 및 스피커 댐퍼등의 전자부품 소재로서 사용되는 자성유체¹⁾는 그 활용도에 따라 적절한 분산매를 선택하여 제조하고 있으며, 계면활성제 또한 분산매의 종류에 따라 상이한 것을 사용

한다. 이처럼 자성콜로이드의 분산특성은 분산매-분산제-분산질 등의 친화력에 의해서 좌우되며, 입자표면에 흡착되어 있는 계면활성제의 응집 억제 역할 또한 주요한 변수로서 작용한다.

자성유체의 분산안정특성은 강자성 미립자가 분산매 중에 분산되어 있을 때, 두 미립자가 브라운 운동에 의해

상호근접시 입자간에 작용하는 여러 작용력에 의해서 결정된다. 마그네타이트 현탁액 중에 작용하는 힘으로는 크게 반데르 바알스력(Van der Waals force), 자기적 인력(magnetic attraction), 정전기적 반발력(electrostatic repulsion), 입체적 안정화(steric stabilization) 등으로 나누어진다²⁾. 이 중 수상자성유체의 분산안정성은 계면활성제 피복층에 의한 입체적 안정화 이외에도 물리흡착층을 구성하고 있는 계면활성제의 해리부위에 의한 정전기적 안정화가 주요한 역할을 한다. 하지만 유상자성유체의 분산안정성은 계면활성제 피복층에 의한 입체적 안정화가 주요한 힘으로 작용하므로, 2종 이상의 계면활성제를 조합하여 사용함으로써 우수한 분산특성을 얻을 수 있을 것이다^{3,4)}.

따라서 본 연구에서는 오래인산등으로 피복된 초미립 마그네타이트(Magnetite, Fe₃O₄) 중에 aliquat 336 등의 제2계면활성제가 용해되어 있는 toluene, MEK(methyl ethyl ketone) 혼합용액을 첨가한 후, 이들 슬러리(slurry)를 건조하여 유기용매에 분산시키는 유상자성유체 제조공정을 제안하고자 한다.

2. 실험방법

Fig.1은 본 실험의 개략도이다. 본 연구에서는 전보⁵⁾에서와 마찬가지로 실온 25°C에서 Fe²⁺의 초기 농도 0.10 M, Fe²⁺/Fe³⁺의 비가 2/3인 FeCl₂·nH₂O와 FeCl₃·6H₂O 공존용액에 암모니아수(NH₄OH)를 첨가하여 마그네타이트를 합성하였다. 이 때 얻어진 마그네타이트 현탁액을 증류수 3l로 세척하여 용액중의 잔존 전해질을 제거한 후, magnetite 현탁액에 소정농도의 sodium oleate를 첨가하여 80°C에서 30분간 반응시켜 화학흡착층을 형성시켰다. 그리고 이들 현탁액을 응집시키기 위하여 3N-HCl용액을 가하여 pH를 5.0~5.5로 조절하였다. 그 후 수용액 중의 전해질 및 유리산을 제거하기 위해서 3l의 증류수와 300 ml의 메탄올(CH₃OH)로 세척 및 여과과정을 반복하였다.

상기 방법에 의해서 얻어진 여과산물에 aliquat 336 등의 제2계면활성제가 용해되어 있는 toluene, MEK(methyl ethyl ketone) 혼합용액을 첨가한 후, 충분히 교반하여 24시간 건조판 위에서 건조를 행하였다. 건조를 통하여 수분이 제거된 산물은 mineral oil, kerosene, 진공펌프오일등에 분산시켜 유상자성유체를 제조하였다.

Table 1은 본 연구에서 사용한 계면활성제 및 분산매를 나타낸 것이다.

한편 자성유체의 분산율은 下飯飯⁶⁾ 등인 제안한 바와

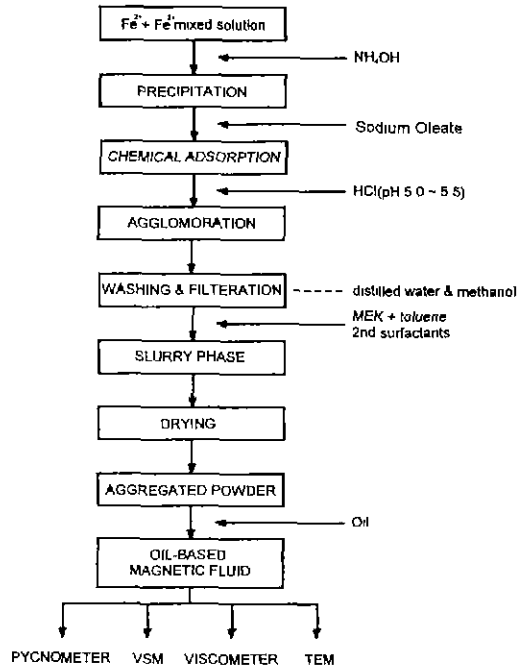


Fig. 1. Experimental procedure to fabricate the magnetic fluid.

같이 분산 직후의 총 마그네타이트 양에 대한 안정하게 분산된 마그네타이트 양의 비로서 계산하였으며 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\text{Dispersion}(\%) = \frac{\rho_2 - \rho_L}{\rho_1 - \rho_L} \times 100 \tag{1}$$

- ρ₁ : 자성유체 제조 직후의 비중
- ρ₂ : 제조 후 5일간 안정화 시킨 후 자성유체의 비중
- ρ_L : 분산매의 비중

본 연구에서는 제조한 직후의 유상 자성유체 12.58 ml를 취하여 측정된 자성유체의 비중값과 100 ml 용량의 graduated cylinder에 넣고 5일간 방치시킨 후, 표면으로부터 12.58 ml를 취하여 측정된 비중값을 식(1)에 대입하여 유상자성유체의 분산율을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 습식법에 의한 초미립 마그네타이트 합성

초미립 마그네타이트(magnetite, Fe₃O₄) 합성에 대한 반응식⁷⁾은 (2)식과 같다.

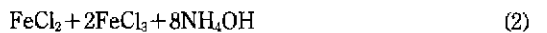


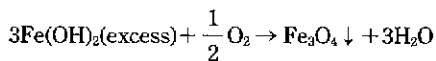
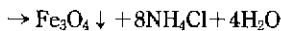
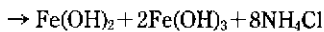


Table 1. Kinds of Surfactants Used in This Experiment

	Surfactant type	Systematic name (common name)	compound
1 st surfactant		Sodium oleate	C ₁₇ H ₃₃ COONa
2 nd surfactant	Cationic	Tricaprylmethylammonium chloride (aliquat 336)	CH ₃ N[(CH ₂) ₇ CH ₃] ₃ Cl
	Anionic	Monomethyl phosphate	CH ₃ O ₄ P·2C ₈ H ₁₇ N
		Diocetyl sulfosuccinate	C ₂₀ H ₃₇ O ₇ SNa
	Nonionic	Sorbitan Monooleate (Ls.80)	$ \begin{array}{c} \text{CH} \\ \\ \text{HCOOH} \quad \text{O} \\ \quad \quad \quad \\ \text{HC} \quad \quad \quad \text{O} \\ \\ \text{HCOOCR} \end{array} + \text{H}_2\text{O} $
		N,N',N'-Polyoxyethylene(10)-N-Tallow-1,3-diaminopropane	
Dispersion medium		Mineral oil	A mixture of petroleum hydrocarbons
		Korosene	A mixture of petroleum hydrocarbons
		2-Ethyl Hexanol Ester of Sebacic acid (Histar M-1321)	
		Diisononyl phthalate (DINP)	 COOC ₉ H ₁₉ COOC ₉ H ₁₉
		Diocetyl adipate (DOA)	$ (\text{CH}_2)_4 \begin{cases} \text{COOC}_8\text{H}_{17} \\ \text{COOC}_8\text{H}_{17} \end{cases} $
		Dibutyl phthalate (DBP)	 COOC ₄ H ₉ COOC ₄ H ₉



마그네타이트 합성은 전보⁵⁾에서 이미 보고한 바와 같이 합성산물의 물성이 자성유체의 제조에 적합한 반응 온도 25°C, 반응시간 10 min., 초기 Fe²⁺의 농도 0.1M, Fe²⁺/Fe³⁺의 비 2/3, NH₄OH 농도 0.90N에서 실험을 하였으며, 이 때 합성된 합성 산물은 평균직경 113 Å, 포화자화값 64.0 emu/g을 나타내었다.

3.2. 유상자성유체의 제조

Fig. 2는 제1계면활성제로서 사용한 sodium oleate의 첨가량에 따른 자성유체의 분산율 변화를 나타낸 것이다. 이 때, 분산매는 mineral oil을 사용하였으며 마그네타이트 20 g, 고체함량 0.20 g/cc, aliquat 336(tricaprylymethylammonium chloride) 첨가량 6.56×10⁻³ mol에서 행하였다. sodium oleate을 첨가하지 않은 경우 분산이 일어나지 않았으나, sodium oleate을 첨가함에 따라 분산율은 급격히 증가하였으며 2.63×10⁻² mol 이상 첨가함에 따라 분산율은 90% 이상 유지하였다. 이같은 결

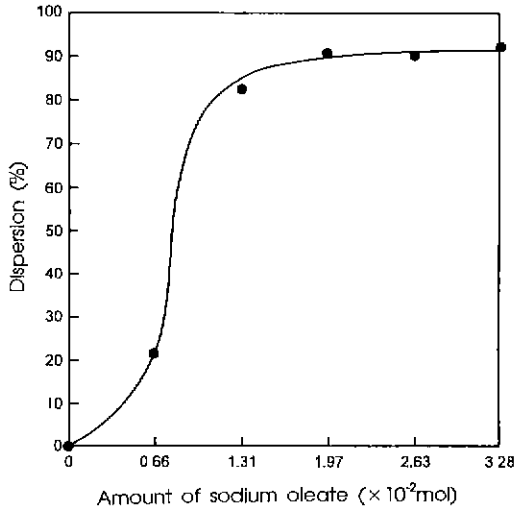


Fig. 2. Dispersion ratio of oil-based magnetic fluids as a function of the amount of sodium oleate addition (solid content=0.2 g/cc, aliquat 336=6.56 $\times 10^{-3}$ mol, $Fe_3O_4=20$ g)

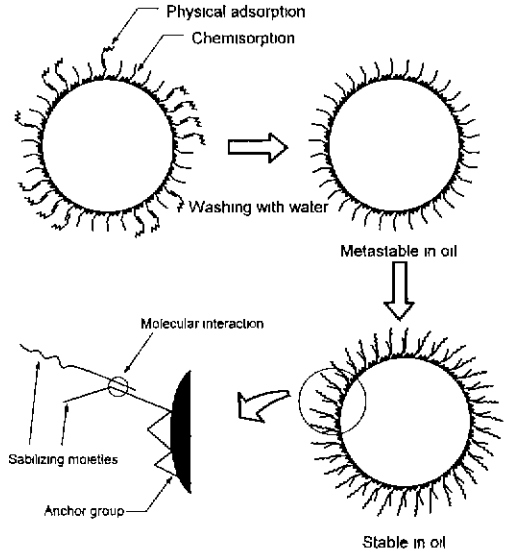


Fig. 3. Schematic illustration for the dispersion mechanism of oil-based magnetic fluid.

과는 제2계면활성제인 aliquat 336에 고정기(anchor group)가 없기 때문에 나타나는 것으로 보여진다. 즉, aliquat 336만을 계면활성제로 사용하여 자성유체를 제조할 경우, 계면활성제를 고정할 수 있는 고정기가 없기 때문에 마그네타이트 표면에서 안정한 소수화 흡착층이 형성되지 않으며, 이에 따라 적절한 입체적 안정화 부위가 생성되지 못한다. 하지만 오레인산을 첨가할 경우에는 Fig. 3에서와 같이 오레인산 이온 중의 카르복실기(COO^-)가 마그네타이트 표면의 Fe 이온과 화학결합하여 마그네타이트 표면에 안정한 흡착층을 형성한다. 또한 제1계면활성제로 첨가된 오레인산 이온의 탄소사슬 부위는 aliquat 336과 Van Der Waals 결합을 이루어 분산에 필요한 안정화기(stabilizing moieties)로서 작용하므로 자성 분말들은 유기용매 중에서 안정하게 분산될 수 있다.

한편, Sambucetti등²⁾은 계면활성제가 마그네타이트 표면에 단분자 피복층을 형성하는데 필요한 계면활성제 양을 Fe_3O_4 의 비표면적에 대한 각각의 지방산 분자가 Fe_3O_4 표면 중에서 점유하는 면적의 비로써 계산할 수 있다고 하였다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다. 이 때 지방산은 단단한 막대기 모양이고, 마그네타이트 입자는 평균 입자 반경이 $r \text{ \AA}$ 인 구형으로 가정하였다.

$$\text{grs fatty acid/gr } Fe_3O_4 = |A/\tau| \times (M_w/N) \quad (3)$$

여기서 A는 피복될 수 있는 분산질의 전체 표면적,

M_w 는 오레인산의 분자량(172.27), N은 아보가드로수이다. 이 때 오레인산 ion 한개당 흡착 단면적(τ)는 20.5 (\AA^2)로 계산하였다.

한편, 입자 반경 r인 입자가 1g당 N_p 개 존재한다면 gram당 입자의 표면적은 다음과 같이 표시된다.

$$A = 4\pi r^2 N_p \quad (4)$$

여기서, N_p 를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$N_p = \frac{1/\rho_{(Fe_3O_4)}}{\frac{4}{3}\pi r^3} \quad (5)$$

이 결과 본 연구에서 사용된 마그네타이트 20g, 반경 56 \AA 에 대해서 단분자 피복에 필요한 지방산의 이론적 흡착량은 1.6×10^{-2} mol이었다. 이값은 자성유체가 80% 이상의 분산율을 나타내기 위해 필요한 오레인산 첨가량과 일치하는 것으로서, 이로부터 유상자성유체를 제조하기 위해서는 단분자 피복량 이상의 오레인산을 첨가해야 함을 알 수 있다.

Fig. 4는 제2계면활성제로 사용한 aliquat 336 첨가량에 따른 분산율 변화를 나타낸 것이다.

이 때, 분산매는 mineral oil을 사용하였으며, 마그네타이트 20g, 고체함량 0.2 g/cc, sodium oleate 첨가량 2.63×10^{-2} mol에서 행하였다. aliquat 336을 첨가하지 않은 경우 51%의 분산율을 나타내었으며, aliquat 336

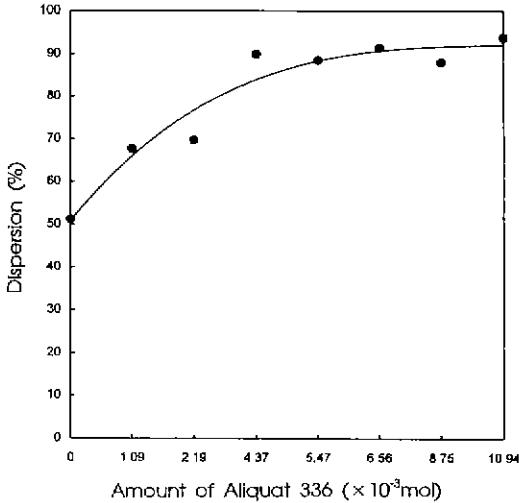


Fig. 4. Dispersion ratio of oil-based magnetic fluids as a function of the amount of aliquat 336 addition (solid content=0.2 g/cc, sodium oleate= 2.63×10^{-2} mol, $Fe_3O_4=20$ g)

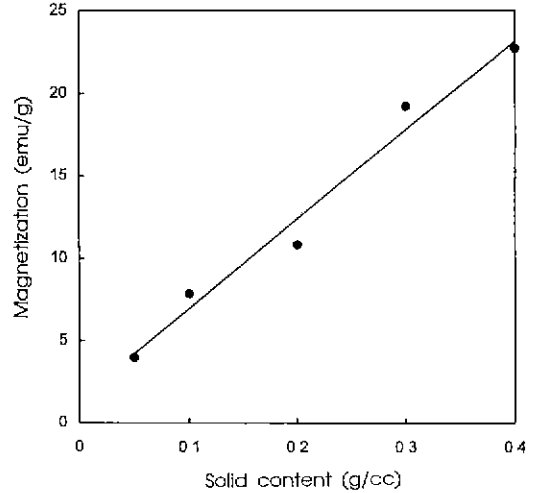


Fig. 5. Saturated magnetization of oil-based magnetic fluids as a function of solid content ($Fe^{2+}/Fe^{3+}=2/3$, sodium oleate= 2.63×10^{-2} mol, aliquat 336= 6.56×10^{-3} mol, $Fe_3O_4=20$ g, room temp.)

첨가량 6.56×10^{-3} mol 이상에서 분산율이 90% 이상 유지되고 있다. 오레인산 만이 첨가된 자성유체의 경우, 오레인산 이온 중의 카르복실기(COO^-)와 탄소사슬부위 ($R: CH_3-CH_2-CH_2 \dots$)는 각각 고정화 및 안정화 부위를 제공하므로 제2계면활성제의 첨가없이도 안정한 분산특성이 나타난다. 하지만 오레인산 만을 사용하여 자성유체를 제조할 경우, 분산 특성에 악영향을 주는 수분 제거에 어려움이 있고, 수분제거시 발생하는 2차응집에 의해서 분산율이 저하된다. 그러나 본 공정에서 제시한 바와 같이 제2계면활성제가 용해되어 있는 toluene, MEK(methyl ethyl ketone) 혼합용액을 첨가한 후 건조작업을 행할 경우, 자성유체 제조 과정에서 잔류하는 수분을 충분히 제거할 수 있을 뿐만 아니라 건조시 발생할 수 있는 2차 응집을 억제할 수 있어 분산율을 향상시킬 수 있었다. 또한 제2계면활성제로 첨가된 aliquat 336은 오레인산의 사슬과 Van Der Waals 결합을 하여 분산 안정화 단위의 계면 농도를 향상시키므로 자성유체의 분산성은 더욱 향상된다.

Fig. 5는 고체함량에 따른 유상자성유체의 포화자화값의 변화를 나타낸 것이다. 고체함량이 0.05 g/cc에서 0.40 g/cc로 증가함에 따라 자계강도 10 kOe에서의 자화값은 3.97 emu/g에서 22.73 emu/g으로 직선적으로 증가하였으며, 이로부터 자성분말의 농도변화가 자성유체의 분산 특성에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이는 입자 표면에 흡착되어 있는 계면활성제에 의한 입체적 안정화(steric

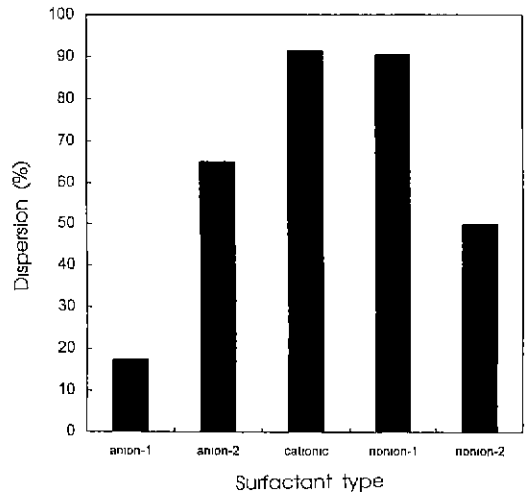


Fig. 6. Dispersion ratio of oil-based magnetic fluids as a function of second surfactant.

(solid content=0.2 g/cc, $Fe^{2+}/Fe^{3+}=2/3$, sodium oleate= 2.63×10^{-2} mol, second surfactant= 6.56×10^{-3} mol, $Fe_3O_4=20$ g, room temp.)

- (anion-1) Monomethyl Phosphate
- (anion-2) Dioctyl Sulfosuccinate
- (cationic) Aliquat 336; Tricaprylmethylammonium Chloride
- (nonion-1) Ls.80: Sorbitan Monooleate
- (nonion-2) N,N',N'-Polydxyethylene(10)-N-Tallow-1,3-Diaminopropane

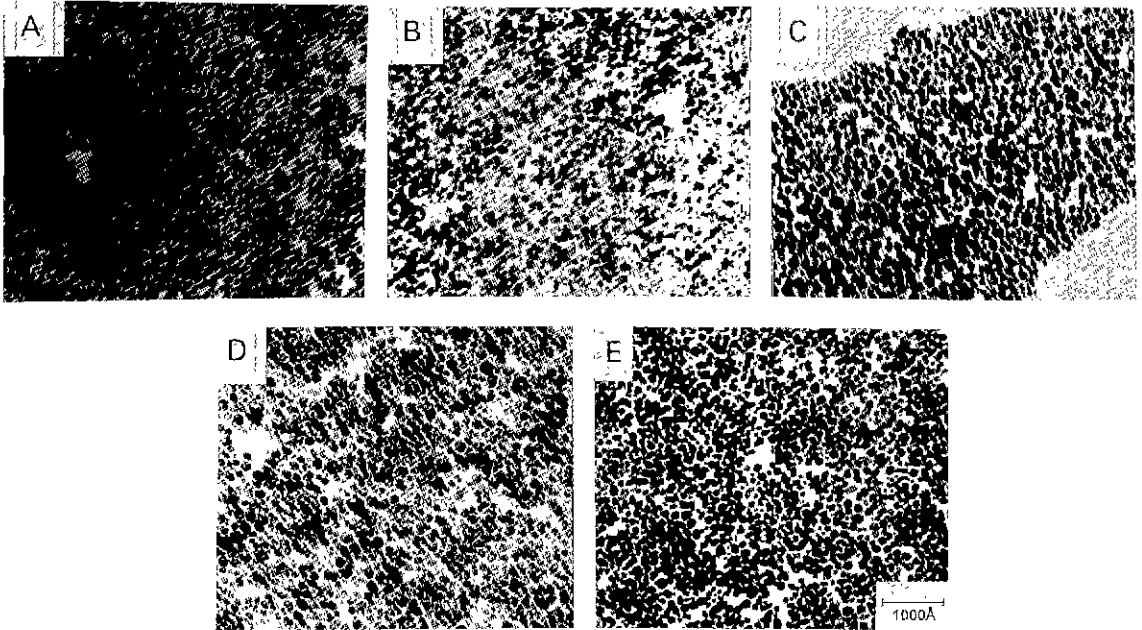


Fig. 7. TEM photographs of oil-based magnetic fluids as a function of second surfactant.
 (solid content=0.2 g/cc, $Fe^{2+}/Fe^{3+}=2/3$, sodium oleate= 2.63×10^{-2} mol, second surfactant= 6.56×10^{-3} mol, $Fe_3O_4=20$ g, room temp.)
 (A) Monomethyl Posphate (anionic)
 (B) Dioctyl Sulfosuccinate (anionic)
 (C) Aliquat 336; Tricaprylmethylammonium Chloride (cationic)
 (D) Ls.80: Sorbitan Monooleate (nonionic)
 (E) N,N',N'-Polydxyethylene(10)-N-Tallow-1,3-Diamnopropane(nonionic)

stabilization) 특성에 기인하는 것으로서, 유체의 농도증가에 따라 입자 상호간의 충돌 빈도가 증가할지라도 분말 주위에 적절한 안정화 부위를 제공한다던 입자간에 작용하는 Van der Waals 력은 극복될 수 있을 것이다.

3.3. 제2계면활성제 및 분산매에 따른 유상자성유체의 분산특성

Fig. 6은 제2계면활성제 종류에 따른 유상자성유체의 분산율을 나타낸 것이다. 이 때, sodium oleate 첨가량은 2.63×10^{-2} mol, 제2계면활성제 첨가량 6.56×10^{-3} mol로 고정하였고, 분산매는 mineral oil을 사용하였다. 그림에서 알 수 있듯이 cationic type인 aliquat 336을 제2계면활성제로 사용한 경우가 가장 우수한 분산율을 나타내었으며, anionic type인 monomethyl phosphate를 사용한 경우는 17%의 낮은 분산율을 나타내었다. 이처럼 분산매를 mineral oil로 고정된 상태에서 제2계면활성제 종류를 변화시켰을때 상이한 분산율을 나타내는 이유는 각 종류의 계면활성제가 가지는 분산안정화 단위와 mi-

neral oil사이의 친화력(용해도) 차이에 기인하는 것으로 생각된다. 따라서 우수한 분산율을 가지는 유상자성유체를 제조하기 위해서는 분산안정화 단위의 농도를 증가시키기 위해 첨가하는 제2계면활성제의 분산안정화 단위와 분산매 사이의 용해도를 충분히 고찰할 필요가 있다.

Fig. 7은 상기 조건에서 제2계면활성제 종류에 따른 유상자성유체의 분산상태를 나타낸 TEM 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 anionic 계면활성제인 monomethyl phosphate를 첨가한 경우는 마그네타이트 입자들이 심하게 응집되었고, cationic 계면활성제인 aliquat 336을 첨가한 경우는 우수한 분산상태를 나타내고 있다.

Fig. 8은 상온하에서의 분산매 종류에 따른 유상자성유체의 분산율을 나타낸 것이다. 이 때, sodium oleate 첨가량은 2.63×10^{-2} mol, aliquat 336 첨가량 6.56×10^{-3} mol로 고정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 mineral oil과 kerosene을 분산매로 사용한 경우는 우수한 분산율을 나타내었으나, 기타 분산매에서는 분산이 이루어지지

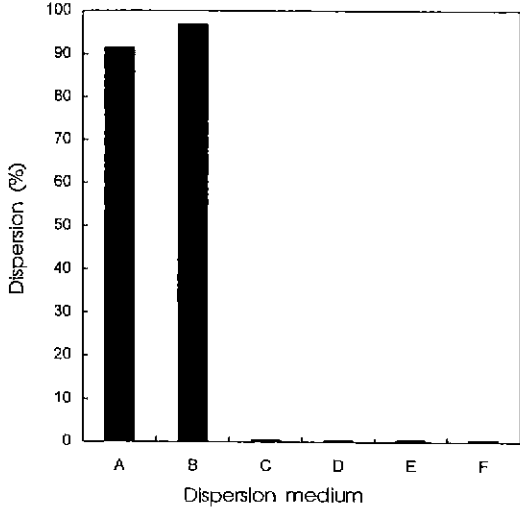


Fig. 8. Dispersion ratio of oil-based magnetic fluids as a function of dispersion medium.
 (solid content=0.2 g/cc, $Fe^{2+}/Fe^{3+}=2/3$, sodium oleate= 2.63×10^{-2} mol, aliquat 336= 6.56×10^{-3} mol, $Fe_3O_4=20$ g, room temp.)
 (A) Mineral oil
 (B) Kerosene
 (C) Hister M-1321; 2-Ethyl Hexanol Ester of Sebacic Acid
 (D) Dinp; Diisononyl Phthalate
 (E) DOA; Dioctyl Adipate
 (F) DBP; Dibutyl Phthalate

않았다. 이처럼 제1계면활성제와 제2계면활성제를 각각 sodium oleate와 aliquat 336으로 고정된 상태에서 분산매를 변화시켰을 때 상이한 분산율을 나타내는 이유는 앞서 언급한 것처럼 계면활성제의 분산안정화 단위와 분산매 사이의 친화력 차이로 생각할 수 있다. 즉, Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이 mineral oil과 kerosene은 hydrocarbon의 구조를 가지고 있으므로, 이같은 분산매에서 자성분말을 분산시키기 위해서는 sodium oleate와 aliquat 336과 같이 탄소사슬을 가지고 있는 계면활성제가 계면활성제로서 적합할 것이다.

Fig. 9는 상기 조건에서 분산매 종류에 따른 유상자성 유체의 분산상태를 나타낸 TEM 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 sodium oleate-aliquat 336계 유상자성 유체 제조시 mineral oil이나 kerosene을 분산매로 사용하였을 때 우수한 분산상태를 나타내었다.

4. 결 론

1. Mineral oil에 분산시킨 유상자성유체의 분산율은 제 33 권 제 8 호(1996)

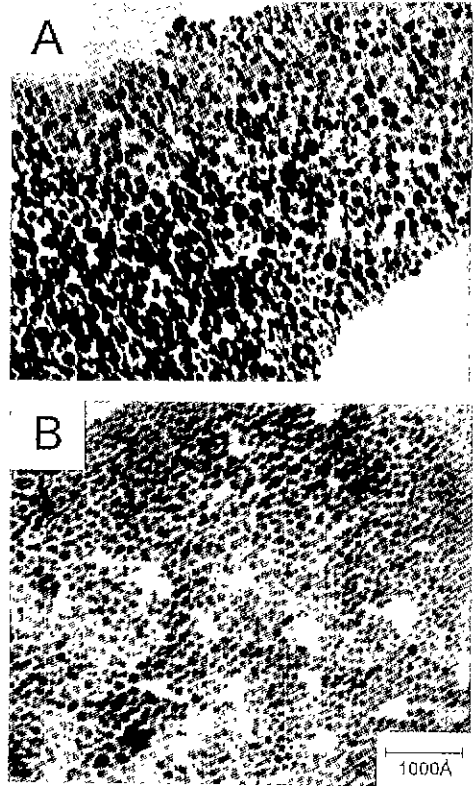


Fig. 9. TEM photographs of oil-based magnetic fluids as a function of dispersion medium.
 (solid content=0.2 g/cc, $Fe^{2+}/Fe^{3+}=2/3$, sodium oleate= 2.63×10^{-2} mol, aliquat 336= 6.56×10^{-3} mol, $Fe_3O_4=20$ g, room temp.)
 (A) Mineral oil
 (B) Kerosene

합성마그네타이트 20g에 대해서 sodium oleate 첨가량 2.63×10^{-2} mol, aliquat 336 첨가량 6.56×10^{-3} mol 이상에서 우수한 분산특성을 보였다.

2. 상기 조건에서 고체함량에 따른 유상자성유체의 포화자화값의 변화를 측정된 결과, 고체함량이 0.05 g/cc에서 0.40 g/cc로 증가함에 따라 자계강도 10 kOe에서의 자화값은 3.97 emu/g에서 22.73 emu/g으로 증가하였으며, 고체함량 변화에 따른 응집현상을 관찰할 수 없었다.

3. Mineral oil에 분산시킨 유상자성유체는 cationic type인 aliquat 336을 제2계면활성제로 사용한 경우 90% 이상의 우수한 분산율을 나타내었으나, anionic type인 monomethyl phosphate를 사용시에는 17%의 낮은 분산율을 나타내었다. 이처럼 제2계면활성제 종류에 따라 상이한 분산율을 나타내는 이유는 각각의 계면활성제가

갖는 분산안정화 단위와 mineral oil 사이의 친화력(용해도) 차이에 기인하는 것으로 생각된다.

4. 제1계면활성제와 제2계면활성제를 각각 sodium oleate와 aliquat 336으로 고정된 상태에서 분산매를 변화시킨 결과, mineral oil과 kerosene중에는 안정하게 분산되었으나 진공펌프오일계에서는 낮은 분산특성을 나타내었다.

REFERENCES

1. 강남기, 오재현, 김만, "자성유체," 전자연구, 2(1), 31 (1993).
 2. V.E. Fertman, "Magnetic Fluids Guidebook: Properties and Applications," 1-11, Hemisphere Publishing Corp., London, 1990.

3. M. Persson, A. Forsgren, E. Carlstorm, L. Kall, B. Kronerg, R. Pompe, and R. Carlson, "Steric stabilization of silicon slips," pp. 624-626 in High tech ceramics, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1987.
 4. 신학기, 장현명, 김태옥, "Steric Stabilization에 의한 석유분산매 자성유체의 제조," 요업학회지, 27(5), 684-692 (1990).
 5. 오재현, 김민석, 김만, 김성완, "해교법에 의한 수상자성유체의 제조 및 특성에 관한 연구," 한국자기학회지, 3(3), 234-240 (1993).
 6. 下飯坂潤三, 中塚勝人, 中鉢良治, 佐藤惟陽, "マグネタイト微粒子の 水相安定分散," 日本化学會誌, 1, 6-9 (1976).
 7. C.J. Sambucetti, "Magnetic ink for printing," *IEEE Trans. on Magnetics*, MAG-16(2), 364-367 (1980).
 8. B.M. Berkovsky, "Magnetic Fluids: Engineering Applications," pp. 17-18, Oxford University Press, New York, 1993.