

## 분극성을 갖는 미세 입자/유전유체 분산계에서의 전기유변효과

김 상 국 · 최 윤 대\*

한국 에너지 기술 연구소  
\*육군 제 3 사관학교

Electrorheological effect on the dispersive system consisting of polarizable  
fine powder/dielectric oil

Sang Guk Kim and Youn Dae Choi\*

Korea Institute of Energy Research

\*Korea 3rd Military Academy

**초 록** 본 연구에서는 분극성을 갖는 미세분말/유전유체 분산계내의 전기유변효과를 mechanism을 중심으로 고찰하였다. 전기유변효과를 일으키는 mechanism을 (1) 입자표면전도(surface conductance) (2) 입자내부전도(bulk conductance) (3) 유도분극(induced polarization)으로 구분하여 설명하였다. 소수성(anhydrous-base) 전기유변유체 내의 미세분말 입자간 상호인력을 예측할 수 있도록 유도분극 mechanism을 적용하여 수학적으로 모델화 함으로써 전기유변효과를 향상 시키기 위한 재료선정의 기초로 하였다. 전기유변유체의 미세입자로 이용될 수 있다고 여겨지는 ceramic, ferrite 및 polymer등 7가지 재료를 선정하여 계산한 결과 ceramic 및 ferrite입자가 입자간 상호인력이 큰 것으로 나타났다.

**Abstract** Electrorheological effect on the dispersive system of polarizable fine powder/dielectric oil has been investigated. ER effect was explained divided into following 3 mechanisms; (1) surface conductance, (2) bulk conductance, and (3) induced polarization. Mathematical model which predicts the interactive force between two fine particles in the electrorheological fluid has been introduced based on the induced polarization mechanism. This model may provide guide to select materials for strong ER effect. The attractive force between two particles was calculated using the above model for the selected 7 materials such as ceramics, ferrites, polymers etc. From the calculation result, it was found that the ceramics and ferrites are good materials which show a strong ER effect.

### 1. 서 론

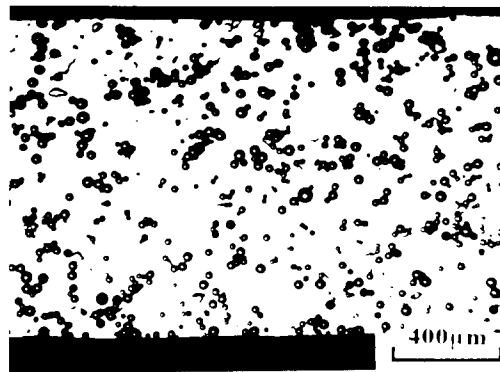
전기유변유체(electrorheological fluid:ERF)는 분극성이 강한 미세입자 분말을 유전유체 속에 분산시켜 제조한 콜로이드로서 인가된 외부전기장에 의하여 유체의 점도가 급격히 증가하는 재료이다. 전기유변 효과는 1940년대 말 W.Winslow<sup>1,2)</sup>에 의하여 최초로 연구되었으며 ERF의 인가된 전기장에 의한 빠른 응답성과 유변효과의 가역성을 이용하여 공학분야 특히 동력전달장치, 이동부가 없는 밸브, 로봇트 제어장치, damper system 및 smart 재료등 광범위한 분야에 응용될 수 있다고 보

고되고 있다<sup>3,4,5)</sup>.

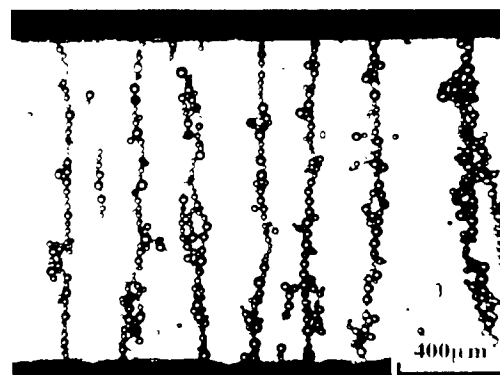
일반적으로 전기유변효과는 외부전기장에 의하여 ERF내에 분산된 분극성이 강한 입자 분말 주변에 불균일한 전기장을 형성함으로써 입자사이에 상호인력이 발생하여 분산된 입자 분말이 인가된 전기장 방향으로 사슬과 같은 구조를 형성하게 한다. 이러한 전기 유변유체가 외력에 의하여 흐르는 경우 입자 chain들이 파괴되지만 전기장이 유지되는한 다시형성된다. 유속이 작을수록 더많은 입자가 chain을 형성하고 특히 chain이 잘 발달되어 있는 정지상태에서 초기흐름을 유도하기 위해서는 더 많은 shear stress가 요구되기 때문에 유변

학적으로 Bingham 유체 모델을 따른다. 이러한 유체는 물성변화가 유체자체의 점도변화에 의한 것이 아니고 입자분말의 배열구조에 의하기 때문에 전기점성효과(electroviscous effect)와 구분하기 위하여 전기유변효과라 칭한다.

Fig. 1은 직경이  $27\mu\text{m}$ 인 작은유리구슬 표면에 약간의 수분을 흡수시킨 다음 silicone oil에 분산시켜 제조한 콜로이드 용액을 전극이 부착된 slide glass위에 놓고 전극사이에 약  $2\text{KV}/\text{mm}$ 의 전기장을 인가하면서 미세 입자들이 전극사이에 사슬구조를 형성하기 전, 후 모습을 관찰한 사진이다.



(a)



(b)

Fig. 1. Effect of DC electric field on the structure formation of an ERF. ERF is  $27\mu\text{m}$  glass beads in silicone oil. (a)  $E=0$  and (b)  $E=2\text{KV}/\text{mm}$ .

현재까지 알려진 대부분의 ERF는 친수성 (hydroous-base) 유체로써 입자표면이 친수성을 띠고 있으며 흡수된 수분은 ER 효과에 매우 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 친수성 ERF를 고온이나 높은 전단 변형율을 요하는 system에 응용할 경우 입자표면에서 수분이 분리되어 수증기화 하기 때문에 ER효과는 현저히 감소하게 된다 따라서 위와같은 조건에서도 ER효과를 나타내기 위하여 수분을 입자 내부에 보존할 수 있는 미세입자(예: zeolite powder) 또는 분극현상이 입자내의 전하분리에 의하여 발생하는 미세입자(예: lithium polymethacrylate powder) 등과같은 소수성 유변유체에 대한 연구가 요구되어왔다.

본 연구에서는 전기유변효과를 일으키는 mechanism을 고찰하였으며, 소수성 전기유변 유체의 입자간 상호인력을 예측할 수 있는 모델을 소개하였다. 또한 이 모델을 바탕으로 유변효과를 향상시키기 위한 재료선정의 지침을 제시하였다.

## 2. 전기 유변유체 재료

ERF는 분극성이 강하며 비교적 높은 유전상수 값을 가진 전기적으로 부도체인 입자분말이 점도가 낮은 유전유체속에 분산혼합된 형태의 재료이며 크게 나누어 친수성 유체와 소수성 유체로 구분할 수 있다.

잘알려진 바와같이 수분을 매개체로 이용하는 친수성 전기유변유체는 mechanism에 따라 Fig. 2의 a와 같이 입자 표면이나 pore에 존재하는 solvation된 입자의 migration(surface conductance)에 의하여 입자사이에 water bridge를 형성하는 경우<sup>6,7)</sup>(예: corn starch/corn oil)와 Fig. 2의 b처럼 입자내부에 발달된 pore에 채워진 수분을 통하여 ion이 이동함(bulk conductance)으로써 입자와 입자사이 마주보는 면에 전기적으로 반대 극성을 띠게 함으로써 입자간에 인력을 발생시키는 경우<sup>6)</sup>(예: zeolite/silicone oil)가 있다. 소수성 전기유변유체는 Fig. 2. c의 경우처럼 분극화 현상이 수분에 의하여 발생되지 않고 유전체막을 갖는 도체 또는 반도체 입자가 인가된 전기장 영향하에 있을때 입자내부에 형성되는 유도

쌍극자간의 상호작용(induced polarization)에 의하여 입자간에 인력이 발생한다(예: polyacene quinones/chlorinated paraffin). 이상과 같이 전기유변유체를 ER효과 발생 mechanism에 따라 구별할 수 있으나 공통적으로 요구되는 재료선정 조건은 다음과 같다<sup>6)</sup>:

- 낮은 전압에서 높은 전단응력을 나타낼 수 있어야 함
- 소모 전력을 최소화 하기 위하여 낮은 전기전도도를 가질 것
- 넓은 온도범위에서도 유변효과를 가질 것
- 분산입자와 유전유체의 밀도가 비슷하여 침전에 대한 안정성이 있어야 함
- 전기장인자가 인가되지 않을 때 낮은 점도가 유지되어야 함
- 유체는 무독성, 불연성, 비휘발성일 것
- 입자는 균일한 분산성과 내마모성을 가질 것

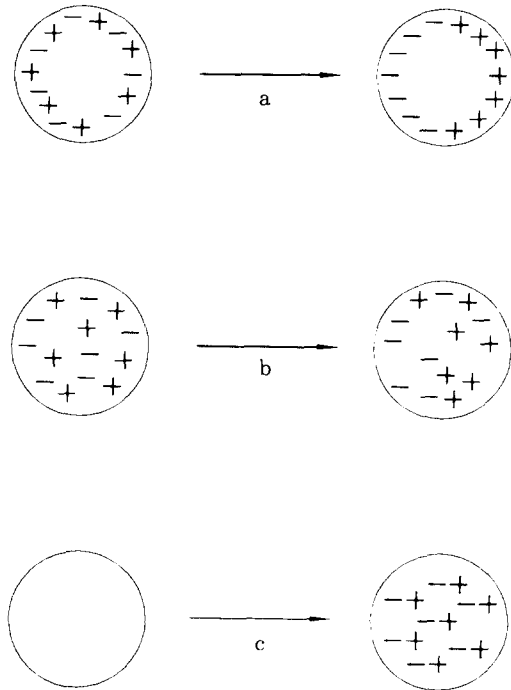


Fig. 2. Some of the means by which particles may be polarized. (a) Surface conductance (b) Bulk conductance [Adopted from ref. 6] (c) Induced polarization.

### 3. 이론적 고찰

#### (가) 친수성 전기유변유체 mechanism

Water bridge형성모델에 따르는 ERF의 입자표면에는 mobile ion이 존재하고 있으며 이 이온들은 solvation 현상에 의하여 물분자에 둘러 싸여 있다. 전기 유변유체가 인가된 외부전기장 영향하에 있으면 입자표면에 존재하던 이온들이 물분자를 동반하여 입자의 한쪽 끝으로 이동을 한다. 따라서 입자와 입자사이에 수분증가로 인한 water bridge<sup>7)</sup>가 형성된다. 외부 전기장이 사라지면 이동되었던 이온들은 random migration에 의하여 입자표면으로 되돌아 온다. 입자사이에 형성된 water bridge는 입자사슬이 shear에 의하여 변형이 일어날 때 계면장력에 역행하기 때문에 전단응력이 증가하게 되는 원인이된다.

반대극성 형성모델에 해당하는 대표적인 입자로 zeolite가 있으며 aluminium dihydrotriphosphate(TPhAl)도 이에 속한다. Zeolite의 일반적인 구조식은  $M(x/n)[(AlO_2)_x(SiO_2)_y] \cdot WH_2O$  이며 M은 n개의 양이온, x와 y는 단위격자를 이루는  $AlO_2$ ,  $SiO_2$ 의 갯수를 나타낸다. y/x값은 zeolite 종류에 따라 1-∞ 값을 가지며 결정중의 Si/Al비를 의미한다. Zeolite 구조에서 알 수 있듯이  $SiO_2$ 는 전기적으로 중성이지만  $AlO_2$ 는 -1 개의 값을 가지고 있으므로 전기적으로 중성을 유지하기 위하여는 금속 양이온을 필요로한다. 금속 양이온은 crystalline aluminosilicate 구조에서 결정구조에 결합되어 있지 않은 상태로 존재한다. 따라서 금속 양이온은 pore내부에서 수분을 매체로하여 이동하는 것이 가능하다<sup>8)</sup>. 오일에 분산되어있는 zeolite 입자들이 외부전기장 영향하에 놓이면 pore내부에 존재하는 금속양이온은 전기장의 영향으로 입자의 한쪽 끝으로 이동한다. 따라서 입자 사이에 반대극성을 띠게 됨으로 전기적인 인력이 발생하여 입자사슬을 형성한다.

#### (나) 소수성 전기유변유체 mechanism

소수성 ERF는 외부전기장의 영향에 의하여 입자 내부에 형성된 유도 쌍극자 간의 상호작용에 의하여 입자에 전기적인 인력이 발생한다. 본 연구에서는 쌍극자 상호작용에 의하여 미세입자간에 발생되는 힘을 modelling

하여 수식으로 유도하며 또한 그 결과가 입자 크기, 전기장의 세기 및 입자와 오일의 물리적 성질에 의하여 어떻게 영향을 받는가를 기술하였다. 수식을 간단히 하기 위하여 분산입자의 형태는 구형이며 같은 크기의 입자들이 균일하게 분산되어 있다고 가정하자.

외부에서 가하여진 전기장은 분산 입자를 전기장 반향으로 분극화 시키는데 이는 전도성 입자의 경우에는 전자들이 입자의 한쪽 끝으로 흐르지만 비전도성 입자는 내부 분자들을 분극화 시켜 형성된 전기쌍극자가 전기장 방향으로 배열함으로써 입자간에 인력이 발생한다.

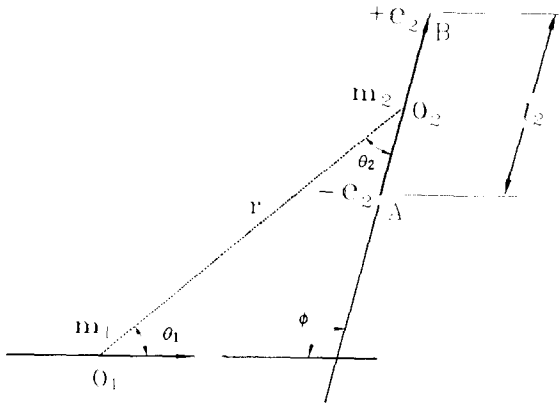


Fig. 3. Location of the dipole  $m_1, m_2$  at arbitrary position.

소수성 ERF를 modelling하기 위하여 두개의 쌍극자 사이에 작용하는 상호 인력을 계산하여 보았다. Fig. 3와 같이 두개의 쌍극자  $m_1, m_2$ 가 임의의 위치에 존재한다고 가정하고 각각  $o_1$ 과  $o_2$ 를 두 쌍극자의 중심점 이라고 하자. AB 방향으로 쌍극자  $m_2$ 가 있으면 이로 인하여 쌍극자  $m_1$ 의 중심점  $o_1$ 에서 전기적인 전위  $\Phi$ 가 발생한다.

$$\Phi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left( \frac{-e}{AO_1} + \frac{e}{BO_1} \right) \quad (1)$$

여기에서  $\epsilon$ 은 절대유전율이다. 전기 쌍극자 내에서 두 전하 사이의 거리  $l_2$ 는 쌍극자 간의 거리에 비하여 매우 작기 때문에  $BO_1$  사

이 거리를  $AO_1$ 사이의 거리를 기준으로 Taylor 급수 전개하면 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi = - \frac{m_1}{4\pi\epsilon} \cdot \text{grad} \left( \frac{1}{r} \right) \quad (2)$$

두 쌍극자에 의한 상호 potential energy  $W$ 는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$W = -e_2\Phi_A + e_2\Phi_B = e_2(-\Phi_A + \Phi_A + l_2 \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \dots) = m_2 \cdot \text{grad}(\Phi) \quad (3)$$

식 (2)에서 구한 전위를 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$W = \frac{m_1 \cdot m_2}{4\pi\epsilon r^3} \frac{3(m_1 \cdot r)(m_2 \cdot r)}{4\pi\epsilon r^5} \quad (4)$$

여기에서 두 쌍극자  $m_1, m_2$  사이의 각  $\phi$ , 그리고  $\theta_1$  및  $\theta_2$ 를 Fig. 3.와 같이 정의하면 potential energy  $W$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W = \frac{m_1 \cdot m_2}{4\pi\epsilon r^3} (\cos\phi - 3 \cos\theta_1 \cos\theta_2) \quad (5)$$

만약에 두 쌍극자  $m_1, m_2$ 가 외부전기장의 영향에 의하여 전기장 방향으로 배열한다면, 두 쌍극자의 사잇각  $\phi$ 는 0이 되므로 식(5)는 다음과 같이 된다.

$$W = - \frac{2m_1 m_2}{4\pi\epsilon r^3} \quad (6)$$

주어진 전기장세기에서 쌍극자가 전기장 방향으로 배열하는 정도는 입자 자체의 material property에 속한다. 쌍극자 사이에 작용하는 힘은

$$F = - \frac{\partial W}{\partial r} = \frac{6m^2}{4\pi\epsilon r^4} \quad (7)$$

여기에서 두 쌍극자의 크기는 같다고 가정하였으며  $\epsilon_f$ 는 유전유체의 절대유전율을 의미한다.

식 (7)을 풀기위하여는 쌍극자  $m$ 가 유전유체의 특성 및 전기장의 함수로 표현되어야 한다. 이 문제를 해결하기위하여 조그만 구형입자에 균일한 전기장이 가하여 짐으로써 발생하는 입자 내부 및 외부의 전기장을 생각하여 보기로 한다. 구의 내부에는 자유전자가 존재하지 않으므로 전기적인 전위는 Laplace식을 만족하여 한다.

$$\nabla^2\Phi = 0 \tag{8}$$

적절한 경계조건을 도입하여 구면좌표계를 적용한 식(8)을 풀면 다음과 같이 외부 전기장 속에 놓인 유전구체 밖의 임의의 점에서 전위는 외부 전기장에 의한 항과 유전구체에 유도된 전기쌍극자 능률의 항으로 나타내 진다.

$$\Phi = -E r \cos\theta + \frac{(\epsilon_p - \epsilon_f) R^3}{(\epsilon_p + 2\epsilon_f) r^2} E \cos\theta \tag{9}$$

여기에서  $E$ 는 외부 전기장세기,  $r$ 은 입자 중심으로 부터 임의의 점까지 거리,  $\theta$ 는 유전구체밖의 임의의 점과 입자에 평행하게 인가된 외부전기장이 입자중심에서 만나는 각 그리고  $R$ 은 구형입자의 반지름을 각각 나타낸다. 하첨자  $p$ 는 입자 그리고  $f$ 는 유전유체를 나타낸다. 쌍극자 간의 거리는 쌍극자와 유전구체밖의 임의의 거리에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 쌍극자 능률은 다음과 같다.

$$m = 4\pi R^3 \epsilon_f E \frac{(\epsilon_p - \epsilon_f)}{(\epsilon_p + 2\epsilon_f)} \tag{10}$$

유전상수  $\kappa$ 는 복소수로서 물질의 유전상수를 진공중의 유전상수로 나눈값이며 이는 capacitance 부분과 conductance부분의 합으로 표현할 수 있다.

$$\kappa^* = \kappa - \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} j \tag{11}$$

여기에서  $\sigma$ 는 전기전도도,  $\omega$ 는 angular frequency,  $\epsilon_0$ 은 진공중에서의 절대유전율을 나타낸다. 식 (10)과 식 (11)을 식 (7)에 대입하면 외부 전기장에 의하여 입자내부에 생성된 쌍극자에 의하여 발생하는 상호 인력  $F$ 를 계산할 수 있다.

$$\frac{F}{\beta} = \frac{(\kappa_f - \frac{\sigma_f}{\omega\epsilon_0} j) (\kappa_p - \kappa_f - \frac{j}{\omega\epsilon_0} (\sigma_p - \sigma_f))^2}{(\kappa_p + 2\kappa_f - \frac{j}{\omega\epsilon_0} (\sigma_p + 2\sigma_f))^2} \tag{12}$$

여기에서  $\beta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \frac{24\pi R^6 \epsilon_0 E^2}{r^4} \tag{13}$$

식 (12)에서 오일은 전기적 부도체 이므로  $\sigma_f = 0$ 가 되며 유전상수가 복소함수 이므로  $F/\beta$  값의 절대값을 취하면 다음과 같다.

$$\frac{F}{\beta} = \frac{\kappa_f [(\kappa_p - \kappa_f)^2 + (\frac{\sigma_p}{\omega\epsilon_0})^2]}{(\kappa_p + 2\kappa_f)^2 + (\frac{\sigma_p}{\omega\epsilon_0})^2} \tag{14}$$

입자자체가 전도성 입자이면 전기장을 인가하는 순간에 전기유변효과를 나타내겠으나 입자가 사슬을 형성시 전하가 입자를 통하여 흐르기 때문에 현실성이 없다. 그러나 입자의 표면을 부전도성 박막으로 입힐 수 있고 박막자체의 두께가 입자의 크기에 비하여 무시할 수 있다고 가정을 한다면 식(14)는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\frac{F}{\beta} = \kappa_f \tag{15}$$

또한 입자자체가 완전한 부도체라 가정한다면  $\sigma_p$ 가 0이 되기 때문에 식 (14)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{F}{\beta} = \frac{\kappa_f (\kappa_p - \kappa_f)^2}{(\kappa_p + 2\kappa_f)^2} \quad (16)$$

ERF에서는 입자의 유전상수가 주변 오일의 유전상수보다 높기 때문에 균일한 외부전기장은 입자주변에서 왜곡(distorsion)되어 입자 표면주위에서 전기장의 세기가 증가함으로써 입자들을 서로 끌어당기게 되어 분산 입자들이 마치 진주 목걸이 처럼 입자 사슬을 형성하게 된다. 이러한 현상을 도식화 하면 Fig. 4와 같다.

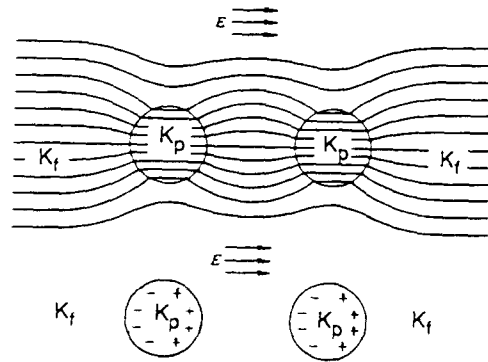


Fig. 4. Force between two dipoles in a dielectric fluid.

Table 1. Dielectric constant as a function of frequency

유전상수 입자, 오일종류	$\epsilon'/\epsilon_0$			$\epsilon''/\epsilon_0$		
	f = 10 <sup>2</sup>	f = 10 <sup>4</sup>	f = 10 <sup>6</sup>	f = 10 <sup>2</sup>	f = 10 <sup>4</sup>	f = 10 <sup>6</sup>
Glasses						
Corning 0080 (Soda-lime-silicate)	8.3	7.35	6.9	0.647	0.162	0.069
Ceramics						
Titania and Titanate Bodies	1240	1170.0	1143.0	44.64	17.55	12.0
Ferrites(Crowley 20)	35400	1590.0	100.0	8.531	0.234	0.014
Plastics						
Bakelite BM-16981	7.6	5.4	4.9	1.748	0.27	0.098
Catalin 700 Base (prystal)	94.0	16.0	8.0	155.1	6.56	1.28
Melamine formaldehyde (Melmac molding)	8.43	6.37	5.77	1.703	0.293	0.237
Elastomer						
Neoprene	7.5	6.2	5.7	4.5	0.205	0.542
Kel F oil	2.61	2.61	2.61	0.006	0.0	0.001

$$\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon''$$

소수성 ERF의 입자 재질이 입자사이에 발생하는 인력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 쌍극자간 상호인력을 계산하기 위하여 유도된 식 (14)를 KEL F 오일(polychlorotrifluoroethylene)을 유전유체로하여 유전상수와 주파수 응답특성이 다른 입자재료 Table 1<sup>9)</sup>에

적용하여 입자간 상호 인력을 계산하여 보았다.  $\beta$ 는 입자의 크기, 전기장 세기 및 입자간 거리의 함수이기 때문에 공통분모로 처리할 수 있어 식 (14)의 계산결과를 Fig. 5와 같이 나타내었다. ceramic과 ferrites입자의 경우 진동수에 무관하게 입자간의 인력이 다른재질에

비하여 높게 계산되었는데 이는 입자의 유전 상수 실수부가 크기 때문이며 catalin의 경우 진동수가 증가함에 따라 입자간의 인력이 급격히 감소하였는데 이는 loss term인  $\epsilon''$ 이 커서 쌍극자를 전기장 방향으로 배열하는데 더 많은 에너지가 소모되었기 때문이다. 나머지 입자들은 입자와 오일간의 유전상수 차이가

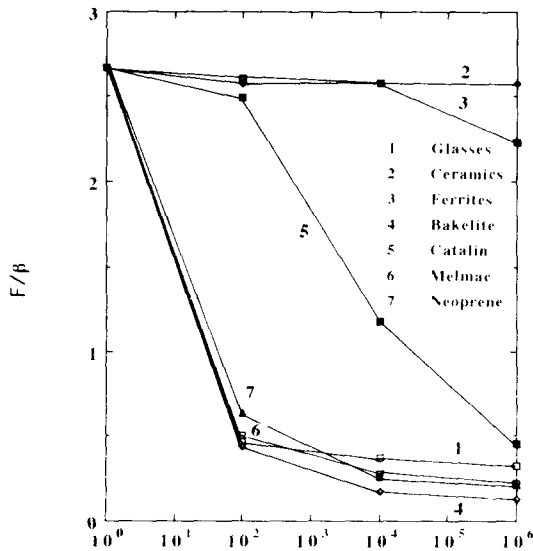


Fig. 5. The calculated forces between particles suspended in dielectric oil under an applied electric field.

적어 입자간의 인력이 작게 나타났다. ERF는 입자와 오일간의 유전상수차가 커야 입자 주변의 전기장 세기가 커져 입자간의 인력이 증대 하지만 식 (14)에서 보는 바와같이 오일의 유전상수가 입자 chain강도 (항복응력)를 결정하는데 매우 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 식 (14)는 바람직한 입자와 오일의 재료를 선정하는데 사용될 수 있지만 이 식의 주요목적은 두 미세입자간의 상호인력을 예측 하는데 있으며 입자 chain강도를 정량적으로 예측하지는 못한다. 입자 chain강도는 두개의 입자만의 인력이 아닌 전기장 방향으로 배열된 여러 입자들의 상호인력과 chain사이의 상호인력에 의하여 결정되기 때문이다.

#### 4. 결 론

분극성을 갖는 미세 입자가 분산된 ERF

내에서의 전기유변효과를 고찰 하였다. 지금까지 알려진 ERF는 친수성 유체로써 고온이나 높은 전단변형율을 요하는 dynamic system에 적용할 경우 입자표면에 흡착된 수분이 분리되어 ER효과를 현저히 감소시켰다. 따라서 입자표면의 수분과 무관하게 ER 효과를 나타내는 소수성 유변유체의 개발이 요구되어 왔다. 본 연구에서는 전기유변효과를 나타내는 원인으로 알려진 3가지 mechanism(입자표면전도, 입자내부전도, 유도분극)중 소수성 유변유체내의 분산입자 상호간의 인력을 계산하기 위하여 유도분극 mechanism을 적용하여 수학적 모델을 제시하였다. 또한 상기 모델을 바탕으로 하여 유변효과를 향상시키기 위한 재료선정의 지침도 제시하였다. 전기유변유체의 미세분말로써 유전유체내에 분산시킬 수 있다고 생각되는 ceramic, ferrite 및 polymer등 7가지 재료를 선정하여 상기 모델에 적용하여 계산한 결과 ceramic과 ferrite분말이 입자간 상호인력이 큰것으로 계산되었는데 이는 ceramic 및 ferrite 입자의 경우 유전상수의 실수부가 허수부에 비하여 커서 쌍극자를 전기장 방향으로 배열하는데 소모되는 에너지가 적고 오일과 입자간의 유전상수차가 높아 입자사이에 높은 전기장을 형성하였기 때문이다.

#### 참 고 문 헌

1. M. W. Winslow, U.S. Patent No. 2, 417, 850 (1947).
2. M.W. Winslow, J.Appl. Phys., 20, 1137-1140, (1949).
3. J.P.Coulter, T.G.Duclos, Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids, Technomic Publ. Co., Lancaster, PA, 300-325 (1990).
4. D.A.Brooks, proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids, Technomic Publ. Co., Lancaster, PA, 371-401 (1990).
5. Z.Lou, R.D.Ervin, F.E.Filisko, Proc. Int. Conf. Electrorheological Fluids, World Scientific Publishing Co., Singapore, 453-464 (1992).

6. H.Block, J.P.Kelly, Proc. 1st Int. Conf. Electrorheological Fluids, NCSU, Raleigh, NC, 1-26 (1989).
7. J.E.Stangroom, Phys. Technol., 14, 290-296 (1983).
8. F.E.Filisko, W.E.Armstrong, U.S.Patent 4, 744, 914, May 17 (1988).
9. Von Hippel, Dielectric materials and Applications, pp 301, The Technology press of M.I.T. and John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y. (1954).