

초음파 시험에 의한 자기유체의 탄성을 산정

김종희[†] · 김진우 · 김철기* · 이승구** · 구만희***

충남대학교 고기능성자성재료연구센터, *충남대학교 재료공학과, **충남대학교 유기소재 · 섬유시스템공학과
***국방과학연구소 국방신기술센터 융복합기술연구부

Elastic Modulus of Magnetic Fluids Evaluated by Ultrasonic Test

Jong Hee Kim[†], Kun Woo Kim, Cheol Gi Kim*, Seung Goo Lee** and Man Hoi Koo***

Research Center for Advanced Magnetic Materials, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

*Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**Dept. of Advanced Organic Materials & Textile System Engineering, Chungnam National University,
Daejeon 305-764, Korea

***Convergence R&D Institute of Defence New-Technology Center, Agency for Defense Development,
Daejeon 305-152, Korea

(2012년 1월 31일 접수 : 2012년 2월 24일 최종수정 : 2012년 2월 25일 채택)

Abstract Magnetic nanoparticles for ferromagnetic fluids and magnetorheological fluids were prepared by chemical coprecipitation and mechanical milling, respectively. The surface-treated particles were dispersed at various weight ratios into a medium of polyethylene glycol. In order to evaluate the elastic modulus of the fluids, ultrasonic pulse velocities were measured with an ultrasonic test using transducers of 5 MHz and 2.25 MHz. The ultrasonic signals were only available with a transducer of 2.25 MHz at fluid concentrations of 5 mg/ml and lower. In the case of applying transducers over 2.25 MHz and concentrations over 5 mg/ml to the fluids, it was impossible to observe effective ultrasonic signals due to an excessive scattering of the pulses by the dispersed particles. Elastic moduli of the magnetorheological fluids were 5.44 GPa and 6.13 GPa with concentrations of 25 mg/ml and 50 mg/ml, respectively; these values were higher by 40% than the values of 4.04 GPa and 4.28 GPa of ferromagnetic fluids at the same concentrations. As for the effect of an external magnetic field on these dilute fluids, the ultrasonic signals were positioned in a very similar way, which was probably due to insufficient arrangement of the particles even though the reflection energy of the ultrasonic waves apparently increased.

Key words ferromagnetic fluid, magnetorheological fluid, ultrasonic signal, transducer, elastic modulus.

1. 서 론

재료의 기계적 주요 성질은 탄성계수 및 강도이며, 이들을 정확하게 측정하는 요소기술이 첨단 기술분야에서 매우 중요시 되고 있다. 지금까지 고체의 성질은 압입 시험, 인장 또는 압축시험 등의 방법에 의해 측정되어 왔으나, 유체에 대해서는 이러한 특성평가 방법이 상대적으로 많이 알려져 있지 않다. 구조적인 관점에서 현탁액인 자기유체는 외부에서 자기장이 가해질 때 분산 입자 내로 자기장에 평행한 자기쌍극자모멘트가 유기되어 입자들을 규칙적으로 배열시킴으로써 점도의 증가에 의해 강직해진다. 이 경우 응집입자의 구조는 이방성을

나타내며, 입자들의 부피분율이 낮으면 사슬상 구조 그리고 부피분율이 높으면 더 복잡한 구조를 형성한다.

용액의 저항응력을 측정하기 위하여 Brookfield viscometer와 같은 점도계가 일반적으로 이용되고 있지만,¹⁾ 외부 자기장 하에서 용액의 성질을 관찰할 경우에는 제어기가 사이에 자석이 위치함으로써 실측에 크게 영향을 미치게 된다. 그러나 물체의 탄성을 조사하는 초음파 속도 측정기에서는 제어기, 오실로스코프 및 탐촉자가 케이블로 서로 연결되므로,²⁾ 자기장을 시험편에 인가하는 경우에 있어서도 측정 데이터는 전혀 영향을 받지 않는다.

초음파는 20 kHz 이상의 높은 주파수를 가진 음파로서 투과성과 직진성이 있어 공학적으로 비파괴 탐상에 자주 이용된다. 재질이 일정한 매질은 초음파가 같은 속도로 통과하지만, 밀도가 다르거나 균열이 있는 부분에서는 음파의 진행 성질이 바뀌므로 제품의 외형 손상없이도 내

[†]Corresponding author
E-Mail : sjh@cnu.ac.kr (J. H. Kim)

부 상태를 확인할 수 있다. 물체의 탄성계수를 구하기 위하여 접촉식 초음파 시험은 대개 종파와 횡파의 속도를 측정하지만, 수침(immersion) 초음파 시험에서는 통상적으로 종파에 대해서만 고려되고 있다.³⁾

이 연구에서 콜로이드상 용액인 페로자성유체(ferromagnetic fluid) 및 자기흐름유체(magnetorheological fluid)에 초음파를 투과시켜 용기에서 반사되어 오는 에너지를 이용함으로써 유체의 탄성계수를 계산하고 그 값을 비교하였으며, 또한 유체에 대한 분산입자의 증량비 증가에 따른 측정상의 한계를 관찰하고자 하였다.

2. 실험 방법

페로자성유체는 화학적 침전법으로 10~15 nm 직경의 마그네타이트 자성입자를 얻은 후, 계면활성제로서 oleic acid 그리고 분산매로서 polyethylene glycol을 사용하여 제조하였다. 자기흐름유체는 Fe-6.5wt%Si 분말을 수십~수백 nm 크기로 미분쇄하여 그 입자를 표면산화한 후, oleic acid를 흡착시키고 polyethylene glycol에 분산 처리함으로써 제조되었다.⁴⁾ 이와 같이 하여 얻어진 유체들은 나노 크기의 자성입자들로 인하여 모두 초상자성을 띠지만, 그 포화자화 값은 자기흐름유체 입자들이 페로자성유체 입자들에 비해 2배 가량 더 높았다.

비파괴 초음파 장비는 Advanced Institute of Quality and Safety (AIQS: (주)품질안전기술원)에서 제작한 APR-S300T를 사용하였으며, pulse 속도는 LeCroy 9304AM의 oscilloscope를 이용하여 측정하였다. 유체의 탄성계수를 구하기 위하여 페로자성유체와 자기흐름유체가 농도별로 준비되고, 이러한 유체들에 대하여 자기장 인가 전후에 측정된 초음파 속도가 서로 비교되었다.

일반적으로 탄성체 내부를 전파하는 길이 방향의 초음파 펄스의 속도 V 는 다음 식(1)에서 계산될 수 있다.⁵⁾

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

여기서 E 는 탄성계수이고 ρ 는 물질의 밀도이다. ν 는 Poisson's ratio로 유체 측정에서 이 값은 무시될 수 있으며, 이 경우 탄성계수를 구하는 관계는 다음 식 (2)와 같이 단순화된다.

$$E \approx \rho \cdot V^2 \quad (2)$$

초음파 펄스의 속도는 식 (3)과 같이 물질 내에서 펄스들이 전파하는 거리를 경과시간으로 나누어줌으로써 얻어진다.

$$\text{Pulse velocity} = \text{Path length} / \text{Transit time} \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

우선 네 가지 종류의 유체, 물(distilled water), 콜로이드상 알코올(alcoholic colloid: conc. 3.2 mg/ml), 자기흐름유체(conc. 25 mg/ml 및 50 mg/ml)에 대하여 5 MHz 중심주파수의 초음파 탐촉자(transducer)를 가지고 측정 시험을 행한 결과를 Fig. 1에서 비교하였다. 초음파 신호에 있어서 첫 번째의 base signal과 두 번째 signal 사이의 간격은 탐촉자 자체의 기계적 특성에 기인한 시간 지연이 포함되어 있어, 두 번째 signal 이후의 peak 간격이 물질 내에서의 초음파 진행시간이 된다. 그러나 자기흐름유체에 있어서는 진행시간 측정이 불가능한 데, 이것은 묽은 콜로이드용액에 비하여 자기흐름유체 내 많은 분산입자들에 의한 초음파의 산란에 기인한다. 이러한 경우, 일반적으로 탐침거리를 줄이거나 또는 5 MHz의 보다 에너지 감쇠가 더 적은 낮은 주파수의 탐촉자를 사용함으로써 초음파의 신호를 증강시킬 수 있다.³⁾ Fig. 2는 2.25 MHz의 초음파 탐촉자를 사용하여 유체농도 25 mg/ml의 페로자성유체와 자기흐름유체에 대한 측정 결과를 보여준

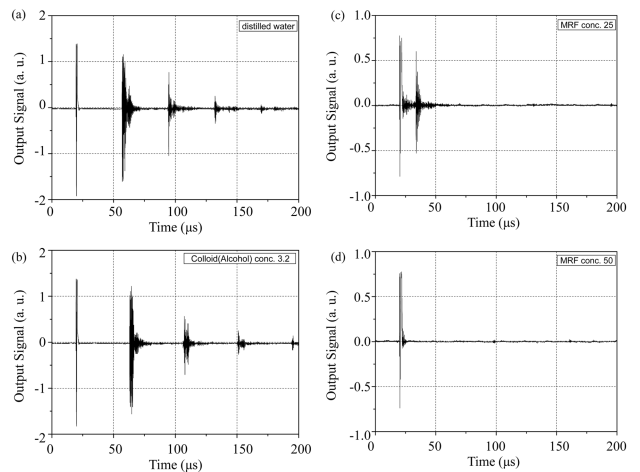


Fig. 1. Ultrasonic signals of (a) distilled water, (b) alcoholic colloid at concentration of 3.2 mg/ml, and magnetorheological fluids (MRF) at concentration of (c) 25 mg/ml and (d) 50 mg/ml measured using transducer of 5 MHz.

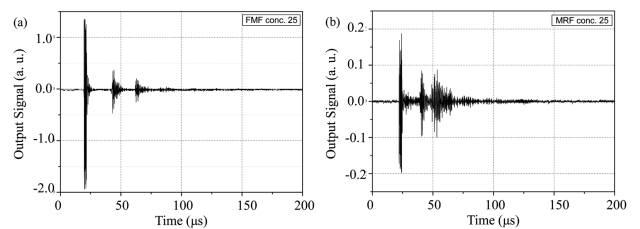


Fig. 2. Ultrasonic signals of (a) ferromagnetic fluid (FMF) and (b) magnetorheological fluid (MRF) at concentration of 25 mg/ml measured using transducer of 2.25 MHz.

Table 1. Elastic modulus E of some fluids calculated with density ρ and ultrasonic velocity V .

Fluid type	Conc. (mg/ml)	V (10^3 m/s)	ρ (10^3 kg/m ³)	E (GPa)
Distilled water	-	1.54	1.00	2.37
Alcoholic colloid	3.2	1.60	0.79	2.02
Ferromagnetic fluid	25	2.00	1.01	4.04
	50	1.90	1.18	4.28
Magnetorheological fluid	25	2.38	0.96	5.44
	50	2.27	1.19	6.13

다. 여기에서 5 MHz의 탐촉자로써 전혀 감지되지 않던 자기흐름유체 뿐만이 아니라 페로자성유체에 있어서도 2.25 MHz 탐촉자에 의하여 신호의 미세감도로부터 속도 측정이 기본적으로 가능한 두 번째 및 세 번째 signal을 뚜렷이 발견할 수 있었다. 자기흐름유체에서 신호들이 페로자성유체에 비해 심하게 겹쳐 보이는 것은 큰 분산입자들에 의한 초음파 산란이 반사에 영향을 끼친 결과라고 생각된다. Table 1에서 측정된 초음파 속도와 유체의 밀도로부터 계산한 탄성계수 값을 표시하였다. 유체밀도는 일정 부피의 비이커에 담겨진 용액의 무게를 직접 측정하여 구하였다.

콜로이드상 알코올의 탄성을 2.0 GPa이 물의 2.4 GPa 보다 약간 작은 것은 희박한 콜로이드 입자에 비해 methanol 매질의 밀도가 0.79 g/ml로 물의 밀도보다 상당히 낮기 때문이며, 또한 25 mg/ml의 유체농도에서 페로자성유체의 탄성을 4 GPa에 비해 자기흐름유체가 5.4 GPa로 높은 것은 분산입자의 크기 효과에 기인하고 있다. 유체에서 입자중량비가 높아짐에 따라 탄성계수의 값이 커지는 경향은 있으나, 이러한 탐침조건에서 유체 내 입자들에 의한 초음파의 산란 또한 더욱 증가하게 된다. Fig. 3은 유체 농도가 50 mg/ml인 페로자성유체 및 자기흐름유체에 대하여 2.25 MHz의 탐촉자를 사용한 자기장 인가 전후의 측정 결과이다. 자기장은 3.5 kG의 영구자석($\Phi 50 \times T10$ mm) 2개를 사용하여 100 ml의 비이커에 담긴 유체시료를 가운데 두고, 초음파 진행방향과는 수직으로 80 mm 간격의 양쪽에서 동등하게 가하여 주었다. 자기장 인가 시, 특히 자기흐름유체에서 초음파의 신호 증가가 뚜렷한데, 이것은 불규칙하게 운동하고 있는 유체 내 입자들의 일부가 자기장의 영향으로 응집하게 됨으로써 초음파의 반사에너지가 커졌기 때문일 것이다. 그러나 자기장에 따른 신호강도의 현저한 변화와는 달리, 자기장 인가 전과 후의 초음파 신호위치는 거의 동일하게 나타났다. 이러한 결과는 자기흐름유체에서 초음파 방향에 수직인 자기장이 가해질 때, 초음파의 진폭은 25% 증가한 반면 속도는 1.6% 정도로 아주 조금 감소한다는 최근의 보

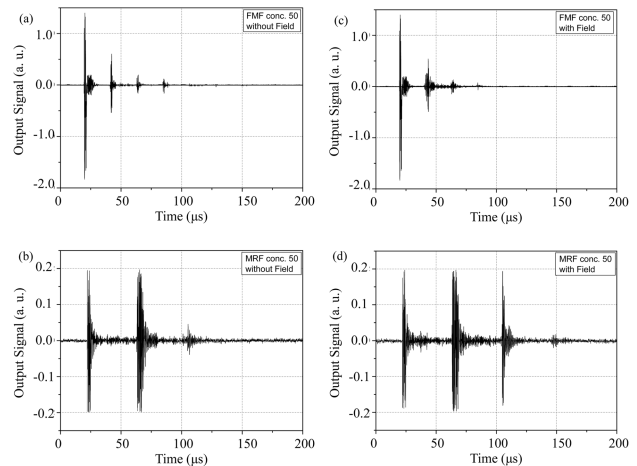


Fig. 3. Comparison of ultrasonic signals measured without field (a, b) and with magnetic field (c, d) for (a, c) ferromagnetic fluid (FMF) and (b, d) magnetorheological fluid (MRF) at concentration of 50 mg/ml using transducer of 2.25 MHz.

고⁶⁾와도 잘 일치하고 있다. 입자중량비가 약 5% 정도인 묽은 농도의 유체에서 탄성계수가 자기장의 인가 유무에 관계없이 동일하게 얻어지는 것은 자기장을 따라 입자 배열이 충분히 이루어지지 않아 초음파의 산란에 의한 에너지 변화에도 불구하고 초음파 펄스의 속도가 뚜렷이 변화하지 않은 데에 기인한다. 그러나 이것은 점도계로부터 동일한 자기장을 적용하여 얻은 유체의 전단강도가 페로자성유체(conc. 50 mg/ml)에서 3.85 kPa로 자기장 비인가 시에 비해 6.7배 그리고 자기흐름유체(conc. 25 mg/ml)에서는 10.70 kPa로 비인가시에 비해 9.6배나 증가한 것과 크게 대비된다.⁴⁾

Fig. 4는 100 mg/ml에서 50 mg/ml 간격으로 300 mg/ml까지의 농도를 가진 자기흐름유체에 대하여 자기장 인가 전과 후에 초음파 속도를 측정한 결과를 보여준다. 자기장 비인가시는 모든 농도에서 base signal만 나타난 반면, 자기장 인가시는 농도 100~200 mg/ml의 유체에 있어서 base signal과 함께 두 번째 signal이 모두 같은 위치에서 약하게 발생하고 있으나, 농도가 더 높은 250 mg/ml 및 300 mg/ml의 유체에서는 단지 base signal만을 보이고 있다. 물론 여기에 사용된 2.25 MHz의 탐촉자 대신에 주파수가 더 낮은 1 MHz의 탐촉자를 적용함으로써 유체의 신호강도가 다소 개선될 소지가 있다 하더라도, 입자중량비가 10% 이상인 고농도의 유체에 있어서는 입자들의 상당 부분이 자석이 있는 양 측면으로 끌려가서 불과 소량의 입자만이 측정영역 내부에 분포하게 되는 결과를 가져온다. 이러한 상황에서 측정된 데이터는 사실상 유체 전체의 특성을 정확히 나타내지 못할 것이다. 그러므로 페로자성유체와 자기흐름유체의 탄성을 얻기 위한 초음파 속도 측정법은 2.25 MHz 이하의 저주파 탐촉

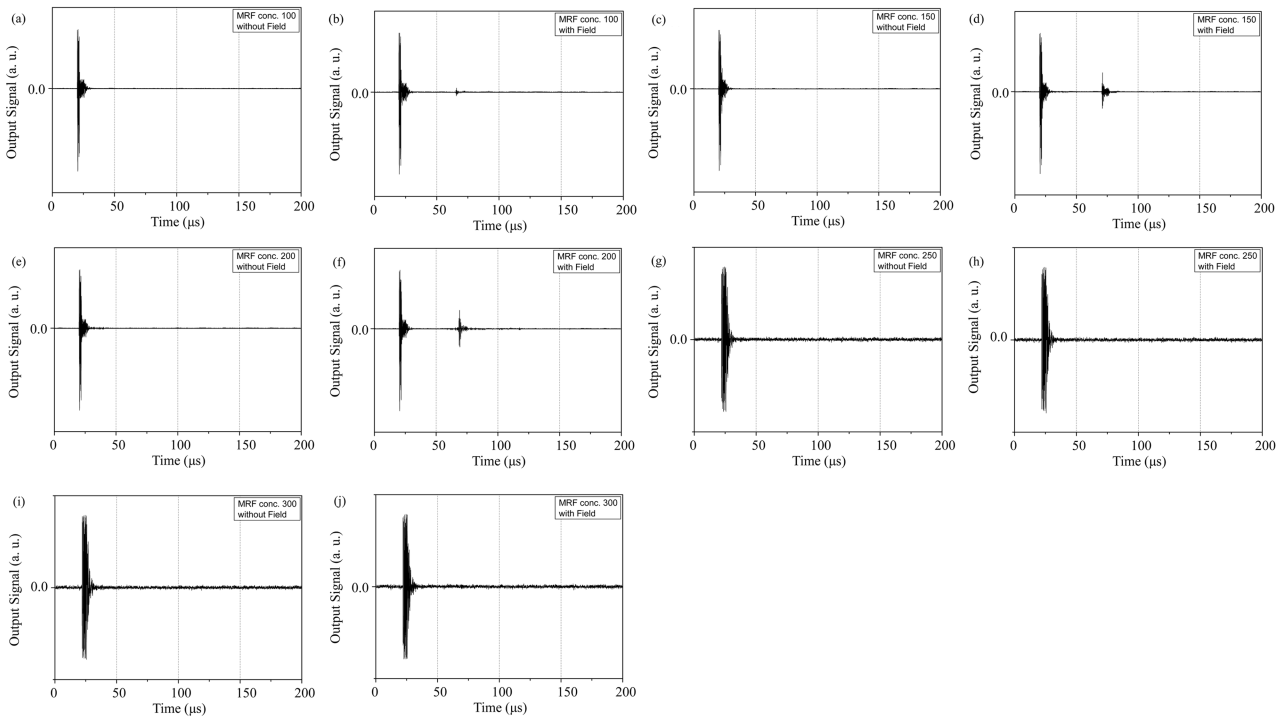


Fig. 4. Ultrasonic signals of magnetorheological fluids at concentrations of (a, b) 100, (c, d) 150, (e, f) 200, (g, h) 250 and (i, j) 300 mg/ml measured without field (a, c, e, g, i) and with magnetic field (b, d, f, h, j) using transducer of 2.25 MHz.

자를 사용하여 유체농도 50 mg/ml 이하의 비교적 묽은 용액에 대해서만 의미있는 결과를 얻을 수가 있다.

4. 결 론

페로자성유체와 자기흐름유체가 각각 화학적 및 기계적 방법에 의하여 여러 농도별로 제조되었다. 초음파 시험법으로 5 MHz와 2.25 MHz의 탐촉자를 사용하여 유체의 초음파 속도를 측정된 결과, 초음파 감쇠가 적은 2.25 MHz 탐촉자를 가지고 유체의 입자중량비가 5% (유체농도 50 mg/ml)까지의 묽은 용액에서만 유의미한 값을 구할 수 있었다. 자기흐름유체의 탄성계수는 25 및 50 mg/ml의 농도에서 각각 5.44 및 6.13 GPa로 같은 농도의 페로자성유체에 비하여 40% 정도 더 높았다. 이러한 묽은 농도의 유체에 있어서 외부자기장에 의하여 반사에너지는 현저히 증가한 반면, 자기장 인가 전후의 초음파 신호위치, 즉 펄스 속도는 거의 동일하였다.

감사의 글

이 연구는 국방과학연구소 10년 단계전환 기초연구사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

1. S. Dasgupta, *Progr. Org. Coating.*, **19**, 123 (1991).
2. D. J. Lee, Y. Cho, J. H. Lee and D. -C. Shin, *J. KSNT*, **29**(5), 458 (2009) (in Korean).
3. Y. Shin, Y. H. Yoon and Y. H. Kim, *J. KSNT*, **28**(1), 40 (2008) (in Korean).
4. J. H. Kim, C. G. Kim, S. G. Lee, H. N. Choi and M. H. Koo, in *Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials*(Jeju, Korea, August, 2011) p. 63.
5. J. Min, J. H. Kim, H. -G Kwak and C. -B. Yun, *J. KSNT*, **28**(2), 164 (2008) (in Korean).
6. J. Rodríguez-López, L. E. Segura and F. M. de E. Freijo, *J. Magn. Magn. Mater.*, **324**, 222 (2012).