

Fluido magnetikoen portaera magnetoreologiko eta biskoelastikoa

J. Berasategui^{1, a}, I. Garmendia^{1, b}, M.J. Elejabarrieta^{1, c}, M.M. Bou-Ali^{1, d}

¹Mondragon Unibersitatea - Goi Eskola Politeknikoa, Loramendi 4, 20500 Arrasate- Mondragón

^a jberasategui@mondragon.edu, ^b izaro.gar@gmail.com, ^c mjelejabarrieta@mondragon.edu,
^d mbouali@mondragon.edu

Gako-hitzak: fluido magnetikoak, magnetoreologia, biskoelastikotasuna.

Laburpena. Fluido magnetikoak likido eramaile eta partikula magnetikoez daude osatuta, eta beraien portaera aplikatutako eremu magnetikoaren menpekoa da. Lan honetan, olio mineralez, sufaktante batez, likatzaile batez eta partikula magnetikoz osatutako fluido magnetikoak sintetizatu dira, partikula magnetikoen bolumen kontzentrazio ezberdinak erabiliz. Fluidoak aplikatutako eremu magnetikoaren arabera karakterizatu dira Anton Paar MCR-501 erreometro birakorraren bidez eta plater paralelo konfigurazioa erabiliz. Bi entsegu mota burutu dira, likatasun eta oszilometria motatakoak. Lehenengo bidez, fluidoaren fluxu-portaera zehaztu da aplikatutako eremu magnetikoaren arabera. Oszilometria entseguetan, lehenbizi, deformazio-ekortze baten bidez, eremu biskoelastiko linealaren muga ezarri da. Ondoren, eremu horren barnean, maiztasun-ekortzeak burutu dira. Entsegu hauen bitartez, materialaren propietate biskoelastikoak ezarri dira partikula magnetikoen kontzentrazioaren eta ezarritako eremu magnetikoaren arabera.

Sarrera

Fluido magnetikoak partikula magnetikoen suspentsioak dira likido eramaile batean. Eremu magnetiko bat aplikatzen denean, partikula magnetikoak fluxu magnetikoaren arabera lerrotzen dira, eta fluidoaren portaera erreologikoa aldatzen da [1]. Aldaketa hau alderantzgarria, eta horregatik fluido magnetikoak material adimenduen taldean sailkatzen dira, eta hainbat aplikaziotan erabiliak izan dira [2, 3].

Fluido magnetikoen osaera zehazterakoan, beraien erabilgarritasuna mugatzen duten zenbait faktore izan behar dira kontuan. Alde batetik, fluido magnetikoei eremu magnetiko bat ezartzean, partikula magnetikoen artean erakarpen indarrak sortzen dira, eta hauen artean agregatu iraunkorrak sortzeko arriskua dago. Beste alde batetik, fase solido eta likidoen arteko dentsitate ezberdintasuna dela eta, sedimentazio prozesuak ematen dira.

Horregatik, fluido magnetikoak sortzeko prozesuan egonkortasun gehigarriak erabiltzen dira, ohikoenak surfaktanteak eta likatzaileak izanik. Surfaktanteak, partikula magnetikoen gainazalean itsatsiz, agregatuak eragozten ditu aldaratze esteriko bidez. Beste alde batetik, likatzaileak sedimentazio prozesua eragozten du likido eramangarriaren likatasuna areagotuz. Honela, fluido magnetikoen egonkortasuna segurtatzeko asmoz ohiko osaketa partikula magnetikoez, likido eramangarriaz, surfaktanteaz eta likatzaileaz dago osatuta.

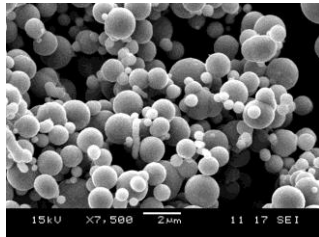
Fluido magnetikoen portaera ezarritako eremu magnetikoaren arabera da. Beraz, bere portaera karakterizatu nahi denean, beharrezkoa da eremu magnetikoaren efektua kontuan izatea. Alde batetik, fluido magnetikoek fluxu-portaera aldatzen dute eremu magnetikoarekin. Horrela, portaera magnetoreologikoa agertzen da. Bertan, fluido magnetikoak ebakidura atalase bat agertzen du, eta baita likatasun aldaketa bat ere. Beste alde batetik, eremu magnetikoaren arabera partikula magnetikoen artean erakarpen indarrak agertzen direnez, material solidoetan ezagunagoak diren efektu elastikoak agertzen dira, eta beraz, portaera biskoelastikoa ematen da.

Lan honetan, lehenbizi, fluido magnetikoak formulatu dira partikula magnetikoz, fluido eramaileaz, likatzaileaz eta surfaktanteaz osatuak. Partikula magnetikoen kontzentrazio ezberdinak erabili dira, aldagai honek fluidoaren portaeran duen eragina aztertzeko. Fluido hauek entsegu mota ezberdinez karakterizatu dira. Lehenbizi, likatasun entseguak burutu dira, eta fluxu parametroak

lortu. Bestalde, fluidoan portaera biskoelastikoa aztertze bi motatako okzilometria entseguak burutu dira. Lehenik, muga biskoelastiko lineala zehazteko, deformazio-ekortzeak burutu dira maiztasun jakin batera, eta ondoren, muga biskoelastikoaren barneko deformazio batekin, maiztasun-ekortzeak burutu dira materialaren denborarekiko dependentzia aztertze.

Materialak eta metodologia

Fluido magnetikoak osatzeko, likido eramangarri bezala olio mineral (Repsol) bat erabili da, eta partikula magnetikoak burdinazkoak esferak izan dira (CIP, BASF). Partikula hauen batez besteko tamaina $1,25 \pm 0,5484 \mu\text{m}$ izan da (ikus 1. Irudia).



1. Irudia. Burdinazko partikula magnetikoak Ekortze Mikroskopio Elektronikoaz.

Egonkortze gehigarri dagokienez, likatzaile bezala Lubrizol® 3702 erabili da eta surfaktante bezala buru polarra eta isats ez polarra duen AlSt tensoaktiboa (Acros). Fluidoan sintesi prozesua likido eramangarriari likatzailea gehituz hasten da, eta gero surfaktantea gehitu da. Surfactantearen kontzentrazioa partikula magnetikoen kopuruaren arabera zehaztu da. Nahasketa homogeen bat lortzeko asmotan, agitazio mekanikoa ezarri da Heidolph RZR 2051 biragailuz. Ondoren partikula magnetikoak gehitzen dira pixkanaka, beti ere agitazio mekanikoa mantenduz. Azkenik, partikula artean sortu daitezkeen agregatuak ezabatzeko, agitazio ultrasonikoa ezartzen da 15 minutuz, eta nahasketari 24 orduz mantentzen zaio agitazio mekanikoa. Partikula-kontzentrazio ezberdinekin lau fluido magnetiko formulatu dira, bolumenean hurrengo partikula kontzentrazioekin: % 5; % 10; % 15; eta % 22.

Entseguak egiteko Physica MCR 501 erreometro birakor bat erabili da Anton Paar etxekoa (ikus 2. Irudia). Erreometroa, MRD 70/1T zelula magnetoreologikoa dago hornitua eta 20 mm-ko plater paraleloan (PP20/MRD/TI/P2) konfigurazioa erabili da. Tenperatura 25 °C-tan mantendu da Julabo F25 bainu termo-iraunkorraren bidez.



2. Irudia. Anton-Paar Physica MCR-501 erreometro birakorra.

Eremu magnetikoaren kontrola zelula magnetoreologikoaren elikatze intentsitatearen bidez burutu da, eta bere neurketa GH-55 gaussimetroaren bidez. Horrela, ezarritako eremu magnetikoaren intentsitatea 0 eta 616,7 kA/m artean egon da.

Lehenbizi, likatasun entseguak burutu dira fluido magnetikoen fluxu-portaera aztertze. Horretarako, ebakidura tentsioa deformazio abiadurarekiko neurtu behar da. Entseguen parametroei dagokienez, deformazio abiaduraren malda logaritmikoa ezarri da 0,001 s⁻¹-tik hasita 600 s⁻¹-ra 80 puntutan zehar eta puntu bakoitzean 3 s egonez. Zazpi eremu magnetiko ezberdin ezarri dira 0 eta 616,7 kA/m artean.

Plater paraleloen neurketa konfigurazioa erabiliaz, neurketa puntu ezberdinetan laginaren tentsioa ez da konstantea. Beste alde batetik, fluido magnetikoek ez dute portaera Newtondarra, eta horregatik DIN-53018-1 [4] arauak zehazten duen parametro mekanikoetatik (momentua eta biraketa abiadura), parametro erreologikoetara (ebakidura tentsioa eta deformazio abiadura) egin beharreko bihurketa ez da egokia. Horregatik, Rabinowitsch-en bihurketa erabili da, (1) ekuazioa [5].

$$\tau_R = \frac{2 \cdot M}{\pi \cdot R^3} \cdot \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \cdot \frac{d \ln M}{d \ln \dot{\gamma}_R} \right), \quad (1)$$

non τ_R ebakidura tentsioa den, M momentua, R plateraren erradioa eta $\dot{\gamma}_R$ deformazio abiadura. Fluido magnetikoen portaera biskoelastikoa ezartzeko oszilometria entseguak burutzen dira [6]. Oszilometria entseguetan deformazio oszilakor bat ezartzen zaie laginei, eta zeharkako tentsioaren magnitudea eta atzerapena neurtu. Horrela, zeharkako tentsioa eta deformazioa neurtu ondoren, laginaren parametro dinamikoak lortzen dira, (2) – (4) ekuazioak.

$$G^* = \frac{\tau_R}{\gamma}, \quad (2)$$

$$G' = G^* \cdot \cos(\delta), \quad (3)$$

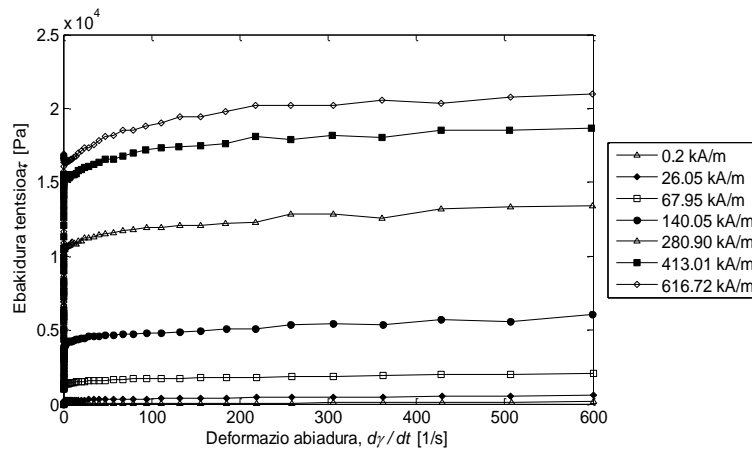
$$G'' = G^* \cdot \sin(\delta), \quad (4)$$

non τ_R ebakidura tentsioa den, γ deformazioa, δ atzerapen angelua, G^* zeharkako modulu konplexua, G' biltegitratze modulu eta G'' galera modulu. Oszilometria entseguen barruan bi mota nagusi nabarmentzen dira. Alde batetik, deformazio ekortzeak eginez maiztasun jakin batera, materialaren muga biskoelastiko lineala zehazten da. Hauen helburua deformazio muga bat ezartzea da non lagin guztiak, edozein baldintzetan, muga biskoelastikoaren barnean egongo diren. Horretarako, deformazio-ekortze lineal bat gauzatu da 50 puntukoa 0,001 %-eko deformaziotik hasi eta 10 %-era, puntu bakoitzean 5 segundu igaroz. Portaera biskoelastikoaren muga biltegitratze modulu eta galera modulu ez konstanteak diren gehienezko deformazio bezala ezarri da. Deformazio ekortze hauek 1 eta 60 Hz-ra, eta 0 eta 616,7 kA/m-ra burutu dira, ondorengo maiztasun ekortzea guztiak eremu biskoelastikoaren barnean egingo direla segurtatzeko.

Bestetik, maiztasun-ekortzeak eginez muga biskoelastiko linealaren barruko deformazio konstante batera, materialaren denborarekiko dependentzia aztertzen da. Horretarako 25 puntuko maiztasun malda lineala ezarri da puntu bakoitzean 4 segundu igaroz eta eremu magnetiko ezberdinak aplikatu dira 0 eta 616,7 kA/m artean.

Emaitzak eta eztabaida

Lehenbizi likatasun entseguen emaitzak aztertzen dira, eta ondoren oszilometria entseguen dagozkienak. % 22-ko partikula kontzentrazioa duen fluido magnetikoaren fluxu kurbetan (ikus 3. Irudia), fluidoaren eremu magnetikoarekiko duen dependentzia handia erakusten da.

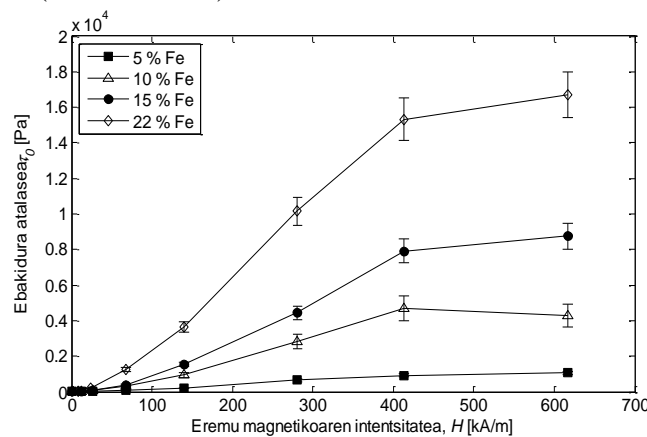


3. Irudia. Fluxu kurbak eremu magnetiko ezberdinentzako % 22-ko kontzentziodun fluidoarentzat.

Lortutako fluxu kurba esperimentalak Herschel-Bulkley modeloaren bidez modelatu dira. Modelo honek zeharkako atalasea duten fluidoaren atalase ondorengo portaera definitzen du, (5) ekuazioa.

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (5)$$

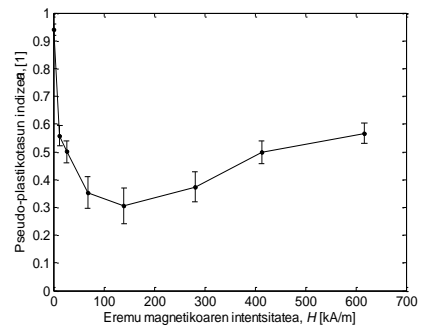
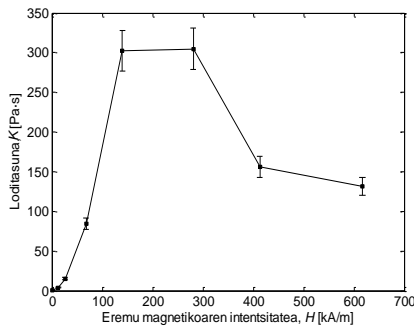
non τ ebakidura tentsioa den, τ_0 ebakidura atalasea, K loditasuna eta n pseudo-plastikotasun indizea. Modeloaren doiketa burutu ondoren, formulatutako fluido ezberdinekin parametroen konparaketa burutu daiteke eremu magnetikoaren intentsitatearen arabera. Horrela, ebakidura atalaseak erakusten dira eremu magnetikoaren intentsitatearen arabera eta partikula kontzentrazio ezberdineko fluidoentzako (ikus 4. Irudia).



4. Irudia. Ebakidura atalasea eremu magnetikoaren intentsitatearen arabera partikula kontzentrazio ezberdinentzat.

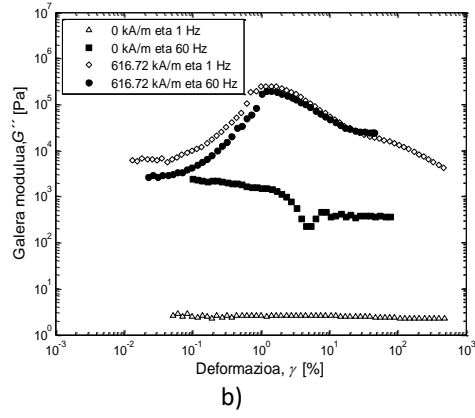
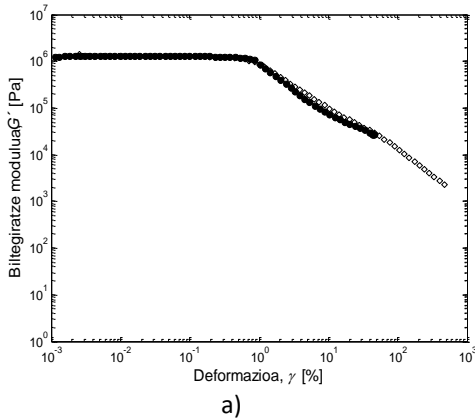
Herschel-Bulkley modeloaren beste parametroei dagokienez (ikus 5. Irudia), loditasun eta pseudo-plastikotasun indizearen bilakaera adierazten da eremu magnetikoaren intentsitatearen arabera % 22-ko partikula kontzentrazioa duen fluidoarentzako. Bertan, loditasunak bilakaera gorakorra du eremu magnetiko baxuetara, baina maximo baten ondoren joera beherakorra du eremu magnetiko altuentzat. Alderantzikoa gertatzen da pseudo-plastikotasun indizearekin. Beste partikula kontzentrazioa duten fluidoek portaera bera ageri dute.

Oszilometria entseguen emaitzei dagokienez (ikus 6. Irudia), deformazio-ekortze erakusten da % 22-ko partikula kontzentrazioa duen fluidoarentzako, 1 eta 60 Hz-ra eta 0 eta 616,7 kA/m-ra burututa. Biltegitatze modulua ez da adierazten 0 kA/m-tara, fluidoak ez baitauka portaera biskoelastikoa eremu magnetikorik aplikatzen ez denean.



5. Irudia. % 22-ko partikula kontzentrazioa duen fluidoarentzat; a) Loditasuna; b) Pseudo-plastikotasun indizea.

Deformazio-ekortzea formulatutako fluido ezberdinekin burutu da, eta horrela bakoitzaren biskoelastikotasun muga ezarri da maiztasun eta eremu magnetikoaren arabera (ikus 1. Taula). % 5 eta % 10-ko partikula kontzentrazioa duen fluidoaren ozsilometria entsegu ezin izan da burutu 0 kA/m-ra, hauek duten likatasun txikiagatik.



6. Irudia. Deformazio ekortzeak % 22-ko partikula kontzentrazioa duen fluidoarentzat; a) Biltegitratze modulua; b) Galera modulua.

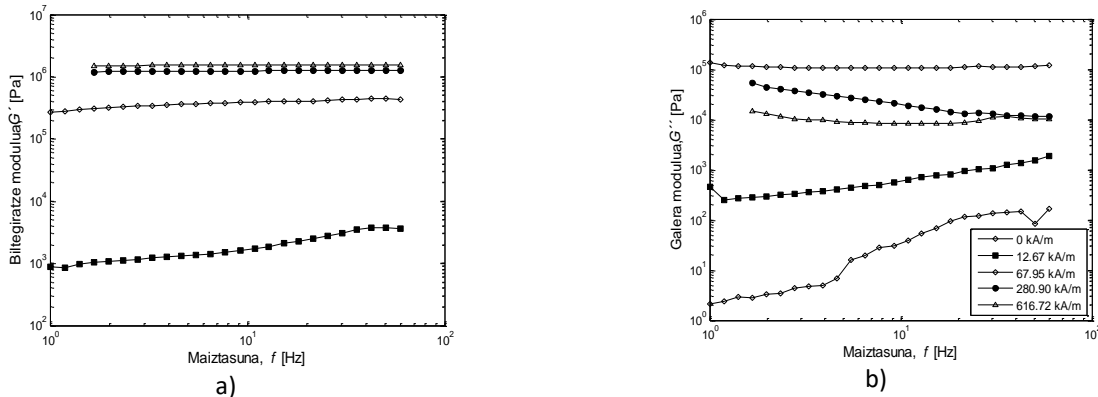
Muga biskoelastikoa ezartzeko garaian, maiztasunarekiko dependentsia gutxi dago, eta eremu magnetikoarekin gutxitu egiten da ezarri daitezkeen gehieneko deformazioa.

1. Taula. Muga bisko-elastikoaren gehieneko deformazioa formulatutako fluidoarentzat maiztasun eta eremu magnetiko ezberdinekin.

Formulatutako fluidoak	0 kA/m		616,7 kA/m	
	1 Hz	60 Hz	1 Hz	60 Hz
5 % Fe	x	x	(%) 0,02	(%) 0,025
10 % Fe	x	x	(%) 0,08	(%) 0,09
15 % Fe	-	(%) 0,80	(%) 0,11	(%) 0,12
22 % Fe	-	(%) 0,70	(%) 0,13	(%) 0,12

Horrela, maiztasun ekortzeak burutzeko % 0,01-eko deformazioa ezarri da. % 22-ko partikula kontzentrazioa duen fluidoaren maiztasun-ekortzeak erakusten dira eremu magnetikoa ezberdinentzako (ikus 7. Irudia).

Biltegitratze moduluari dagokionez, ez du maiztasunarekiko dependentziarik erakusten, eta eremu magnetikoa ezartzean agertzen da, balioa handituz eremu magnetikoaren arabera. Galera moduluari dagokionez, bere magnitudea handituz doa eremu magnetikoarekiko eremu txikietan, baina beranzko joera eremu magnetiko handietan. Horrela, eremu magnetiko handietan fluidoaren portaera solido elastiko modukoa dela esan daiteke.



7. irudia. Maiztasun ekortzeak % 22-ko partikula kontzentrazioa duen fluidoarentzat; a) Biltegitratze moduluua; b) Galera moduluua.

Ondorioak

Fluido magnetikoen portaera aztertu da, partikula-kontzentrazio eta eremu magnetikoaren intentsitatearen arabera. Fluidoaren fluxu-portaera newtondarra da eremu magnetikorik ezean, eta eremu magnetikoa ezartzean honen araberako ebakidura atalase bat ageri da, eta baita likatasun aldaketa bat ere.

Bestetik, fluido magnetikoek portaera biskoelastikoa dutela frogatu da. Horrela, eremu magnetikorik gabe, fluidoaren portaera erabat likatsua da, eta eremua magnetikoa ezarriz, bere portaera solido elastiko baten modukoa izatera igarotzen da.

Eskertzak

Lan honen finantzaketa Eusko Jaurlaritzaren Actimat proiektuaren eta Ikerketa Taldeak programaren (IT557-10); eta Zientzia eta Berrikuntza Ministerioaren Magneto (INNPACTO-020000-2010-006) proiektuaren laguntzarekin burutu da.

Bibliografia

- [1] J. Rabinow. *The magnetic fluid clutch*. AIEE Transaction, Vol. 32 (1948), 1308.
- [2] F.Y. Shirley, J. Dyke, J.M. Caicedo, J.D. Carlson. *Seismic Response Control Using Smart Dampers*. American Control Conference Proceedings, Vol. 2 (1999), 1022.
- [3] K.H. Gudmundsson, F. Jonsdottir, F. Thorsteinsson. *A geometrical optimization of a magneto-rheological rotary brake in a prosthetic knee*. Smart Materials and Structures, Vol. 19 (2010), 3.
- [4] DIN 53-018: *Measurement of the Dynamic Viscosity of Newtonian Fluids with Rotational Viscometers*, Germany (1976).
- [5] P.R. Soskey, H.H. Winter. *Large Step Shear Strain Experiments with Parallel-Disk Rotational Rheometers*. Journal of Rheology, Vol. 28 (1984), 625.
- [6] G. Schramm. *A practical approach to Rheology and Rheometry*. Thermo Electron GmbH, Germany (2004).