



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

III. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2019ko maiatzaren 27, 28 eta 29
Baiona, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Sandwich biskoelastikoen
nukleoaren lodieraren eragina
igogailu baten erantzun
dinamikoan**

*Mikel Mendizabal, Jaione Iriondo,
Leire Irazu, Xabi Hernández
eta Maria Jesús Elejabarrieta*

148-155 or.
<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iii.03.19>



Sandwich biskoelastikoen nukleoaren lodieraren eragina igogailu baten erantzun dinamikoan

Mendizabal, Mikel¹; Iriondo, Jaione¹; Irazu, Leire¹; Hernández, Xabi² eta Elejabarrieta, Maria Jesús¹

¹*Mekanika eta Ekoizpen Industrialak, Mondragon Unibertsitatea*

²*Orona, Hernani*

mikel.mendizabale@alumni.mondragon.edu

Laburpena

Bibrazioak ahultzeko helburuarekin sandwich biskoelastiko meheen erabilera zabalki balioztatua izan da. Mintz itsasgarri biskoelastikoz eta azal metalikoz osaturiko sandwich egiturek ezaugarri dinamiko hobetuak dituzten konposite egitura meheak osatzen dituzte. Nukleo biskoelastikoari esker, sandwicharen moteltze gaitasuna asko handitzen da, panel metaliko soilekin konparatuz. Lan honetan, igogailu baten zenbakizko eredua aurkezten da, sandwich biskoelastikoak erabiliz nukleoaren lodierak igogailuaren erantzun dinamikoan duen eragina aztertzeko helburuarekin. Analisiaren emaitzek mintz biskoelastikoaren lodierak igogailuaren erantzun bibrakorra zehazten duela erakusten dute.

Hitz gakoak: Sandwich biskoelastiko; Modulu konplexu; Zenbakizko eredu; Igogailu

Abstract

The use of thin viscoelastic sandwiches in terms of vibration attenuation has been widely validated. Sandwich structures composed of viscoelastic adhesive films and metallic constraining layers result in thin composite structures with improved dynamic capabilities. Due to the viscoelastic core, the damping capacity of the sandwich is considerably increased compared to metallic panels. In this work, a numeric model of a lift using viscoelastic sandwiches is presented, in order to evaluate the influence of the core thickness on the dynamic response of a lift. The results show that the thickness of the viscoelastic film determines the vibrational response of the lift.

Keywords: Viscoelastic sandwich; Complex modulus; Numerical model; Lift

1. Sarrera eta motibazioa

Material biskoelastiko bidezko moteltze teknika pasiboak bibrazio estrukturalak kontrolatzeko eta energia akustikoak disipatzeko teknika merkeak dira. Material biskoelastikoa bi geruza zurrunen artean kokatu daiteke, sandwich egitura bat osatuz, non material biskoelastikoa ebakidura moduan deformatzen den, energia disipatuz. Egitura hauek oso interesgarriak dira piezen masa kritikoa den aplikazioetan, edota erresistentzia-pisu eta zurruntasun-pisu erlazio altuak lortu nahi diren aplikazioetan; industria aeronautiko, automozio, trenbide eta itsas industrietan, esaterako (Rao, 2003).

Gaur egun, sandwich egiturak osatzeko erabiltzen diren material biskoelastiko konbentzionalak mikra tamainako mintz biskoelastiko itsasgarriengatik ordeztuak izaten ari dira (Irazu eta Elejabarrieta, 2015; Martinez eta Elejabarrieta, 2010; Martinez eta Elejabarrieta, 2011). Mintz itsasgarri hauek eta azal metalikoak erabiliz, zurruntasun-pisu eta moteltze-pisu erlazio altuko sandwich egiturak lortzen dira. Gainera, sandwicharen lodiera totala xafla metalikoen lodieraren oso antzekoa denez, metalezko xafla eraldaketa prozesu konbentzional bidez egin daitezke. Ezaugarri hau oso interesgarria da, honi esker geometria konplexuko moteltze handiko piezak fabrikazio urrats gutxiagorekin lortu daitezkelako, kostuak eta denbora murriztuz.

Bestalde, legediak zarata eta bibrazio mailen inguruan gero eta erregulazio zorrotzagoak inposatzen dituela kontuan izanik, NVH (ingelesezko *Noise, Vibration and Harshness*-etik datorrena, hau da, zarata, bibrazio eta zakartasuna) portaeraren garrantzia ezin da mezprezatu, eta funtsezko bereizgarria bihurtu da (Jonckheere et al., 2012).

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Gaur egun, igogailuetako kabinak eraikitzeke panel metalikoak erabiltzen dira. Zurruntasun aldetik propietate egokiak eskaintzen dituzten arren, metalak ez dira materialik onenak bibrazioak ahultzeari dagokionean. Beraz, eta aurreko atalean azaldutako arrazoiengatik, mintz biskoelastikoz osaturiko sandwich egiturak material konbentzionalen alternatiba interesgarria izan litezke, igogailu eta bestelako garraio bertikaleko aplikazioetan.

Igogailuko kabinako bibrazioen moteltze egokia lortzeko, sandwich egiturek izan beharreko diseinua aztertzea beharrezkoa da. Hori dela eta, lan honen helburu nagusia sandwich biskoelastikoen nukleoaren lodierak igogailu baten erantzun dinamikoan duen eragina aztertzea da. Horretarako, lodiera ezberdineko geruza biskoelastikoz osaturiko hiru sandwich egitura mehe aztertzen dira analisi honetan.

Alde batetik, materialaren karakterizaziorako, aurretiko lan batean (Irazu eta Elejabarrieta, 2015) eginiko saiakuntza esperimental bat erabiltzen da. Ondoren, sandwich probeten zenbakizko ereduak aurkezten eta balioztatzen da ABAQUS 6.14 software-a erabiliz, eta sandwich egituraz eraikitako igogailuaren erantzun dinamikoa kalkulatu da horrekin. Azkenik, hiru sandwich ezberdinen erantzun dinamikoa konparatu da, nukleoaren lodierak igogailuaren kabinako bibrazioen ahultzean duen eragina zehazteko.

3. Ikerketaren muina

3.1. Materiala

Propietate geometriko eta fisikoak

Aztertutako sandwich egitura simetrikoa da, eta azal metalikoz eta mintz biskoelastikoz osatua dago. Material biskoelastiko ezberdinak erabiltzen dira honelako egituretan: Neoprenoa edo polikloroprenoa (Leibowitz eta Lifshitz, 1990, Lifshitz eta Leibowitz, 1987), polimero akrilikoak (Araújo et al., 2010, Hamdaoui et al., 2015, Felipe Filho et al., 2017) eta PVB edo polibiniloa (Hamdaoui et al., 2015), esaterako.

Gure kasuan, aurretiko lan batean (Irazu eta Elejabarrieta, 2015) poliesterra oinarrian zuten bi itsasgarri ezberdin konparatu ziren. Biek zurruntasun antzekoa badute ere, bigarrenak moteltze askoz handiagoa du. Sandwich egiturak erabiltzearen helburu nagusia bibrazioak ahultzea izanik, lan honetan moteltze handiko itsasgarria erabiltzea erabaki da. Bestalde, AISI 316 altzairu herdoilgaitza (MatWeb) erabili da azal metaliko moduan.

Sandwich egituraren eta bere osagaien propietate geometriko eta fisikoak, balioztatzerako erabili direnak, 1. taula eta 2. taulan ikus daitezke, hurrenez hurren. H -k lodiera adierazten du, b -k zabalera, eta ρ -k dentsitatea. Kontuan izan (\cdot_e) eta (\cdot_v) azpiindizeek zati elastiko eta biskoelastikoei egiten dietela erreferentzia.

1. taula. Sandwicharen propietate geometriko eta fisikoak

Sandwich		
H ($\pm 0,002$ mm)	b ($\pm 0,1$ mm)	ρ ($\pm 0,05$ g/cm ³)
0,472	9,9	7,37

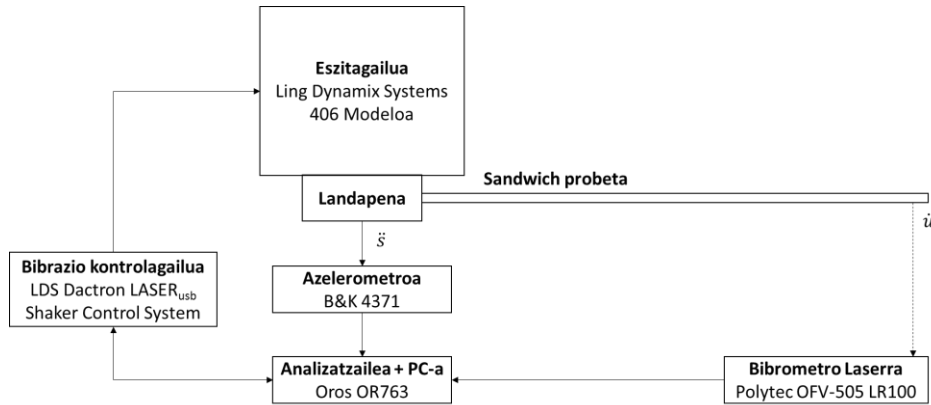
2. taula. Sandwicharen osagaien propietate geometriko eta fisikoak

Azal metalikoa		Geruza biskoelastikoa	
H_e ($\pm 0,002$ mm)	ρ_e (g/cm ³)	H_v (± 2 μ m)	ρ_v (g/cm ³)
0,216	7,96	41	1,13

Materialaren karakterizazioa

Bai azal metalikoak bai nukleo biskoelastikoa erresonantziadun bibrazio behartuen saiakuntza baten bidez karakterizatu dira. Prozedura esperimental osoa aurretiko lan batean dago deskribatua (Irazu eta Elejabarrieta, 2015). Saiakuntza honetan probetak maiztasun tarte zabal batean eszitatzen dira, tarte horretako erresonantzia maiztasunak aurkitzeko. 1. irudian saiakuntza esperimentalaren eskema ikus daiteke.

1. irudia. Saiakuntza esperimentalaren eskema



Saiakuntza esperimentalean, *Cantilever* eran kokatutako sandwich habearen erantzun dinamikoa neurtzen da. Ertz finkoan mugimendu bat eragiten zaio probetari eszitagailu elektrodinamiko bat erabiliz, eta azelerometro batekin neurtzen da bertako azelerazioa (\ddot{s}). Aldi berean, ertz librearen abiadura (\dot{u}) bibrometro laser baten bidez neurtzen da. Ertz finko eta librearen azelerazioen arteko erlazioak erakusten du sandwicharen erantzuna, transferentzia funtzio (T) bezala ezagutzen dena (1).

$$T^*(\omega) = \frac{U^*(\omega)}{S^*(\omega)} \quad (1)$$

non $U^*(\omega)$ eta $S^*(\omega)$ abiaduraren deribatuaren Fourier-en transformatua eta ertz finkoan aplikatutako mugimenduaren Fourier-en transformatua diren, hurrenez hurren. Transferentzia funtziotik abiatuz, sandwich egituraren eta bere mintz biskoelastikoaren propietateak lortzen dira. Material biskoelastikoen kasuan, modulu konplexuak (E^*) tentsio eta deformazioaren arteko erlazioa adierazten du, bibrazio egoera batean. Modulu honek bi propietate biltzen ditu: metatze modulua (E'), materialak metatzen duen energia, zati elastikoari dagokiona; eta galera modulua (E''), materialak disipatzen duen energia, zati biskosoari dagokiona (2).

$$E^* = E' + iE'' \quad (2)$$

Ekuazio horretan, i -k unitate irudikaria adierazten du. Metatze eta galera moduluen arteko erlazioa galera faktore (η) bezala definitzen da (3). Galera faktoreak materialaren moteltzea adierazten du.

$$\eta = \frac{E''}{E'} \quad (3)$$

Sandwich egituren kasuan, nukleo biskoelastikoak ebakiduran egiten du lan. Ebakidura esfortzuen kasuan, E^* , E' eta E'' propietateak G^* , G' eta G'' bezala idazten dira, hurrenez hurren.

Saiakuntza esperimentalaren bidez, sandwich egituraren metatze modulua eta galera faktorea kalkulatu dira, ondorengo ekuazioak erabiliz (4,5):

$$E' = \frac{12\rho L^4 f_n^2}{H^2 C_n^2} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\Delta f_n}{f_n} \quad (5)$$

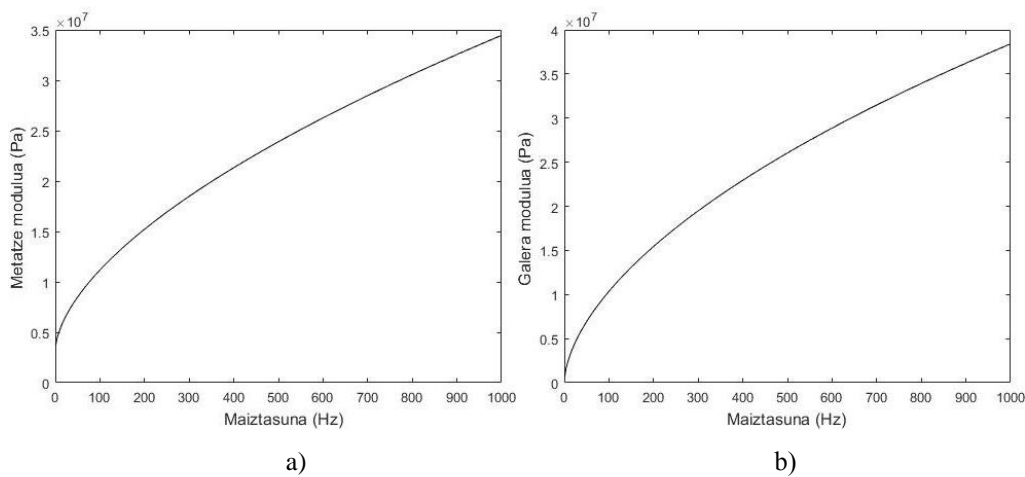
Lehen esan bezala, ρ -k sandwicharen dentsitatea adierazten du eta H -k bere zabalera. L -k probetaren luzera adierazten du eta C_n , n bibrazio moduari dagokion koefiziente bat da, ASTM E 756-05 arauan zehaztua (ASTM, 2005). f_n probetaren maiztasun naturala da, transferentzia funtziotik ondorioztatzen dena, funtzioak maximoa duen puntuari dagokion maiztasuna izanik. Azkenik, Δf_n ere transferentzia funtzioak ematen duen propietatea da, puntu maximoaren balioa 3 dB murrizten den maiztasun tartea.

Sandwicharen propietateak ezagututa, mintz biskoelastikoaren ebakidurako modulu konplexua kalkulatu daiteke, egituraren dimentsio totalak eta osagai bakoitzaren dimentsio eta propietateak kontuan izanik.

Beraz, prozedura hori jarraituz sandwich egituren karakterizazioa gauzatu da. Alde batetik, metalaren moteltzea material biskoelastikoarena baino askoz ere txikiagoa denez, bere portaera elastikoa dela kontsideratzen da, moteltzearen balioa 0 izanik. Saiakuntzako emaitzetatik, metalaren modulu elastikoa 205,7 GPa-ekoa dela kalkulatu da. Itsasgarriak, ordea, portaera biskoelastikoa du, eta bere portaera dinamikoa deskribatzeko, lehen azalduko propietateak kalkulatu dira, G' eta G'' , alegia.

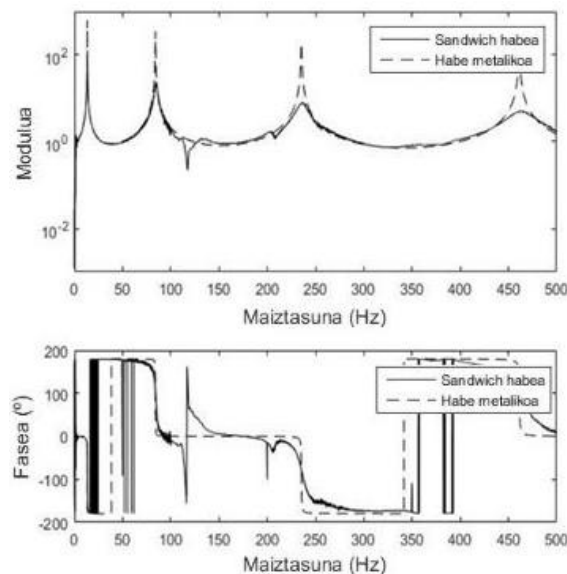
Hainbat eredu daude material biskoelastikoen propietateak modelizatzeko, eta lau parametroko deribatu frakzionarioen ereduak izan da lan honetan erabili dena (Nashif et al., 1985, Jones, 2001). Eredu honetan, Zener-en eredu klasikoaren orokortze bezala ere ezagutua, deribatu ez osoak edo frakzionarioak erabiltzen dira. Materialaren portaera deskribatzeko lau parametro bakarrik doitu behar direla da bere abantaila nagusia, parametro horiek propietate fisikoekin zerikusia dutelarik. Eredu horrekin zehazturiko ebakidura modulu konplexua 2. irudian ikus daiteke.

2. irudia. Doitutako ebakidura modulu konplexua (a) metatze modulua eta (b) galera modulua



Aurreko irudietan ikusten den bezala, itsasgarriaren maiztasunarekiko menpekotasun handia dela eta, zurruntasuna zein moteltzea nabarmen handitzen dira maiztasuna areagotzean. Material biskoelastikoak duen eragina ikusteko, 3. irudian, sandwich probetaren eta lodiera bereko habe metaliko baten arteko konparaketa ikus daiteke.

3. irudia. Sandwich habearen eta habe metalikoaren transferentzia funtzioak



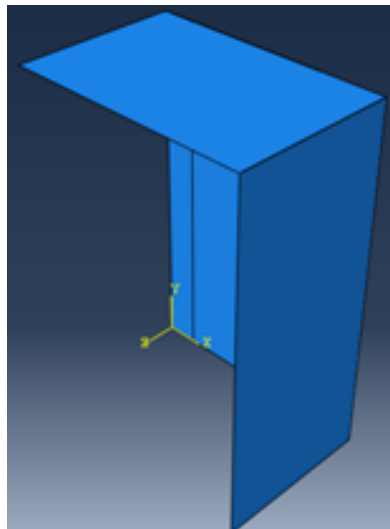
Aurreko irudian ikusten da bi kasuetan maiztasun naturalak oso antzekoak direla, funtzioaren maximoak ia maiztasun berdinetan ematen direlako. Maximo horiei dagozkien anplitudeak, ordea, asko murrizten dira sandwich egituren kasuan, moteltzea handitzen dela adieraziz. Ondorioz, itsasgarri biskoelastiko bat sandwich konfigurazioan erabiltzeak bibrazioen ahultze handia dakar, zurruntasunean ia inolako aldaketarik eragin gabe.

Igogailuaren zenbakizko eredua

Igogailuaren zenbakizko eredua ABAQUS software-aren bidez garatu da. Software honek elementu finituen metodoa erabiltzen du ingeniartzako aplikazio desberdinen inguruko kalkuluak egiteko, bai estatikoak, baita, kasu honetan bezala, dinamikoak ere. Sandwich egiturentzat hiru geruzako eredu bat egin beharrean (bi azal metaliko eta mintz biskoelastikoa bakoitza bere aldetik), geruza bakarreko eredu homogeneizatu bat egin da, S8R xafla elementuak erabiliz. S8R elementuak laukizuzen formako elementuak dira, 8 nodoz osatuak, nodo bakoitzak 6 askatasun gradu dituelarik. Eredu baliokidea egiteak propietate homogeneizatuak esperimentalki kalkulatu beharra dakar, baina nodo kopuru totala gutxitzen da, kalkuluaren denbora asko murriztuz, eta lehen hurbilketa bezala balio du.

Orokorrean, igogailu baten neurri estandarrak 2,2 m x 1,5 m x 1 m ingurukoak izaten dira. Simetria kontsideratuz, eta eredua errazteko helburuarekin, igogailuaren laurden bat modelizatu da. 4. irudian ikus daiteke igogailuaren eredua.

4. irudia. Igogailuaren eredu dinamikoa



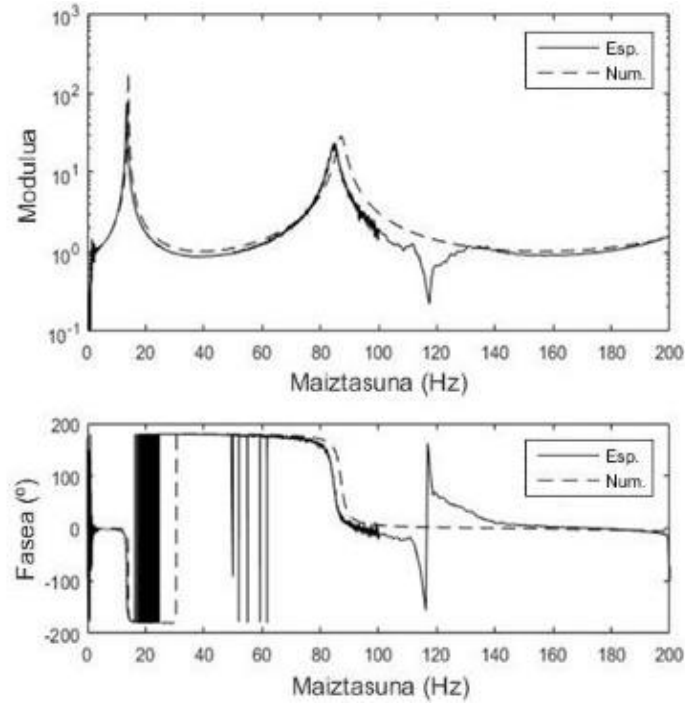
Ohiko konfigurazioan, bidaiarien kabina errail artean gidatua izaten da, eta errailen eta kabinaren arteko kontaktua alboko paneletan ematen da. Horregatik, eraikitako ereduaren, sandwich egiturak alboko paneletan erabili dira, kabinaren gainontzeko ataletan altzairuzko panelak jarritz. Eszitazio iturri bezala 10 mm-ko desplazamendu bat kontsideratu da, 100 Hz-rainoko maiztasun tartean, eta mugimendu horretan oinarrituta alboko aurpegiaren eta aurrekoaren arteko transferentzia funtzioa kalkulatu da.

Hiru sandwich egitura aztertu dira, lodiera ezberdineko nukleoekin; lodiera hauek 25, 100 eta 250 μm izanik. Eskuragarri zeuden neurketa esperimentalak direla eta, ereduaren balioztatzea 41 μm -ko nukleo biskoelastikoa, 170 mm-ko luzera eta 10 mm-ko zabalera dituen sandwich egitura bat erabiliz egin da. Aipatzekoa da bibrazio linearrak kontsideratu direla analisisian, eta bibrazioen ahultzea transferentzia funtzioa erabiliz kalkulatu dela.

3.3. Emaitzak eta eztabaida

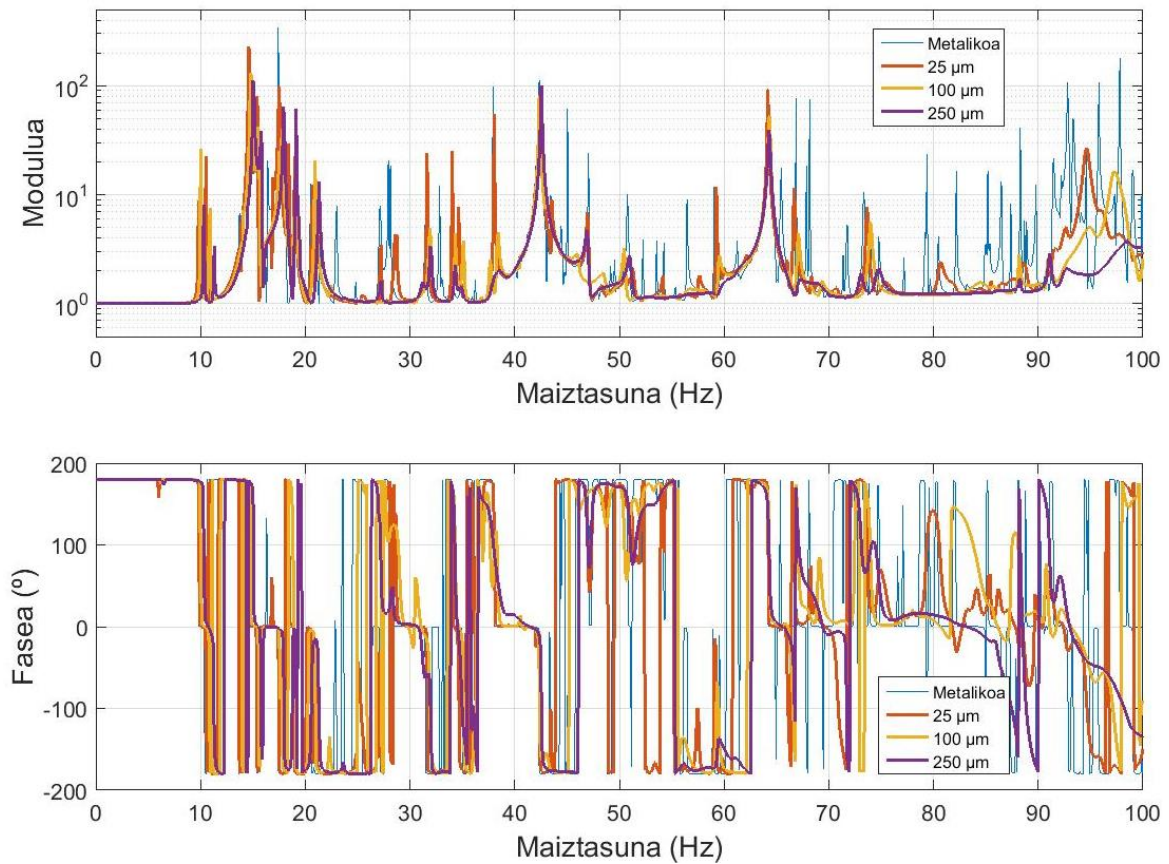
41 μm -ko lodierako nukleodun sandwich bat erabiliz balioztatu da eredua. 5. irudian, ABAQUS bidez lorturiko eta saiakuntza esperimentalaren bidez lorturiko sandwich egituraren transferentzia funtzioen arteko korrelazioa ikus daiteke. 200 Hz-rainoko maiztasun tartea aztertu da.

5. irudia. Transferentzia funtzio experimental eta numerikoak



Bi transferentzia funtzioen artean korrelazio ona ikusi denez, eredu balioztatua izan da. Ondorioz, sandwich egituren eredu hori erabiliz, igogailuaren kabinaren eredu eraiki da. 6. irudian, hainbat lodierako nukleoak erabiliz eraikitako hiru kabinen transferentzia funtzioen konparaketa ikus daiteke.

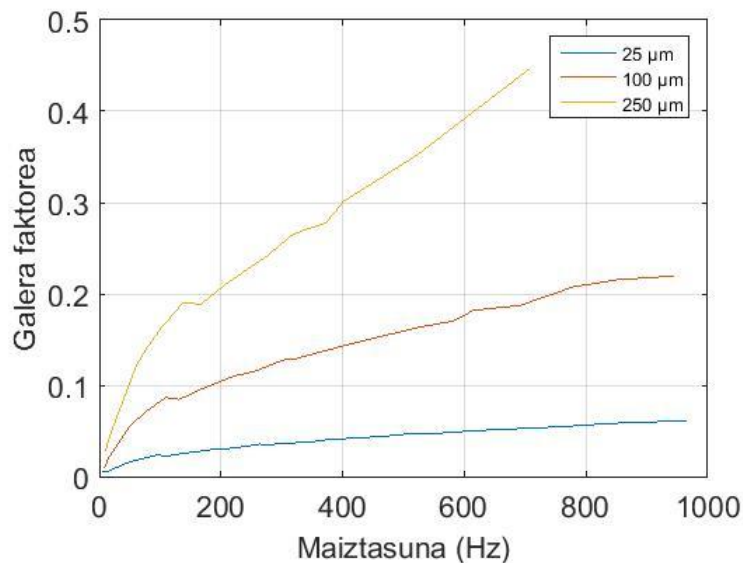
6. irudia. 25 μm , 100 μm eta 250 μm -ko lodieradun sandwichezko kabinen transferentzia funtzioak



Igogailuaren hormen azalera sandwichen lodierarekin konparatuta oso handia denez, egitura oso malgua da. Horren ondorioz, bibrazio modu asko ikus daitezke maiztasun tarte txiki batean, eta hiru funtzioen konparaketa apur bat nahasia bihurtzen da.

Maiztasun baxuetan, hiru lodieratako sandwichen moteltzea oso antzekoa da, egitura metalikoarena gehiegi hobetu gabe. Honen arrazoa hobeto ulertzeko, 7. irudian hiru lodiera hauetako nukleodun sandwich probeten galera faktorearen balioak ikus daitezke. Lehenago aipatu den bezala, material biskoelastikoez menpekotasun handia dute maiztasunarekiko. Horregatik, 7. irudian ikus daitezke nukleoaren lodiera handituz probetaren moteltzea asko areagotzen dela maiztasun altuetan. Maiztasun baxuetan, ordea, moteltze oso baxua dute hirurek.

7. irudia. 25 μm , 100 μm eta 250 μm -ko lodieradun sandwich probeten galera faktorea



Kabina mailara itzuliz, maiztasun baxuetan hobekuntzarik antzematen ez den arren, 6. irudian ikus daitezke maiztasun altuagoetan (70 Hz-tik aurrera) ikusten dela lodiera ezberdineko nukleoa erabiltzearen eragina. Nukleoaren lodiera handitu ahala, sandwicharen moteltze ahalmena areagotu egiten dela ikusten da. Ondorioz, esan daitezke 100 Hz-rainoko tartean, bibrazio nagusiak ematen diren tartean, ahultzearen areagotzea esanguratsua bihurtzen dela nukleoaren lodiera handitu ahala.

4. Ondorioak

Honako hauek dira azterketa honetan lortu diren ondorio nagusiak:

- Nukleo biskoelastikodun sandwich baten bibrazioen ahultzea frogatu da.
- Habearen zenbakizko transferentzia funtzio eta esperimentalen korrelazioan oinarrituta, igogailuaren zenbakizko eredu balioztatu da.
- Igogailuaren bibrazio ahultzea areagotu egiten da nukleoaren lodiera handitu ahala.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Analisi honetan aztertutako sandwich egiturak material jakin batekoak izan dira. Ez da aztertu azal metaliko edo nukleo biskoelastiko bezala beste material batzuk erabiltzearen eragina. Ondorioz, interesgarria izango litzateke material ezberdinak aztertzea, igogailuaren erantzun dinamikoan nola eragingo luketen ikusteko.

Izan ere, analisi honekin lortu nahi dena igogailuetako sandwich panelen optimizazioa da. Kasu bakoitzean komeni den bibrazioen ahultzea lortzeko, material egokienak eta euren dimentsio optimoak zeintzuk diren jakitea izango litzateke azterketa honen azken helburua.

6. Erreferentziak

- Araújo, A.L.; Soares CMM; Soares CAM eta Herskovits, J. (2010), “Optimal design and parameter estimation of frequency dependent viscoelastic laminated sandwich composite plates”, *Composite Structures*, 92, 2321-2327.
- ASTM E 756-05 (2005), “ASTM E 756-05: Standard test method for measuring vibration damping properties of materials”.
- Felippe Filho, W.N.; Barbosa, F.; Roitman, N.; Magluta, C. eta Borges, F.C. (2017), “Experimental and numerical evaluation of viscoelastic sandwich beams”, *REM – International Engineering Journal*, 70, 281-287.
- Hamdaoui, M.; Robin, G.; Jrad M. eta Daya, E.M. (2015), “Optimal design of frequency dependent three-layered rectangular composite beams for low mass and high damping”, *Composite Structures*, 120, 174-182.
- Irazu, L. eta Elejabarrieta, M.J. (2015), “The influence of viscoelastic film thickness on the dynamic characteristics of thin sandwich structures”, *Composite Structures*, 134, 421-428.
- Jonckheere, S.; Vivolo, M.; Pluymers, B.; Vandepitte, D. eta Desmet, W. (2012), “Combined experimental-numerical characterisation of the vibro-acoustic properties of lightweight panels”, *9th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*.
- Jones, DIG. (2001): *Handbook of viscoelastic vibration damping*, John Wiley and Sons Ltd, Chichester.
- Leibowitz, M. eta Lifshitz, J.. (1990), “Experimental verification of modal parameters for 3-layered sandwich beam”, *International Journal of Solids and Structures*, 26, 175-184.
- Lifshitz, J.M. eta Leibowitz, M. (1987), “Optimal sandwich beam design for maximum viscoelastic damping”, *International Journal of Solids and Structures*, 23, 1027-1034.
- Martinez-Agirre, M. eta Elejabarrieta, M.J. (2010), “Characterisation and modelling of viscoelastically damped sandwich structures”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52, 1225-1233.
- _____ (2011), “Dynamic characterization of high damping viscoelastic materials from vibration test data”, *Journal of Sound and Vibration*, 330, 3930-3943.
- MatWeb, Material Property Data, “AISI 316 Stainless Steel, annealed plate”.
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=3a413dabd215462da3408e6e8b761349>
- Nashif, A.D.; Jones, D.I.G.; Henderson, J.P. (1985): *Vibration damping*, Wiley, New York.
- Rao, M. (2003), “Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes”, *Journal of Sound and Vibration*, 262, 457-474.

7. Eskerrak eta oharrak

Lan hau AVISANI (DPI2015-71198-R, espainiar gobernua), AVISANI (PI_2016_1_0026, Eusko Jaurlaritza) eta CONMATEC (KK-2018/00026, Eusko Jaurlaritza) proiektuen eta Replasa S.A.-ren bidez partzialki lagundua izan da.