

KRIITTISEN TAAJUUDEN JA DILATAATIORESONANSSIN VAIKUTUS SANDWICH-LEVYN ÄÄNENERISTÄVYYTEEN

Esa Nousiainen, Jukka Tanttari

VTT Tuotteet ja tuotanto
PL 1307 /Tekniikankatu 1, 33101 TAMPERE
esa.nousiainen@vtt.fi

1 JOHDANTO

Sandwich-rakenteella tarkoitetaan tyypillisesti kolmikerroksista levyrakennetta, joka koostuu kahdesta ohuesta ja jäykästä pintalevystä, joiden väliin on liimattu paksu ja pintalevyihin verrattuna joustava ydin. Kuitukomposiittilaminaatin lisäksi tyypillisiä pintalevyn materiaaleja ovat teräs ja alumiini. Sandwich-levyn ydin on usein vaahtomuovia, balsaa tai hunajakennoa. Ilmailusovelluksissa käytetään usein hiilikuitu-nomex-yhdistelmiä, koska keveydestä ja lujuudesta ollaan valmiita maksamaan.

Sandwich-konstruktioilla voidaan helposti toteuttaa pinta-alamassaltaan pieni mutta hyvin jäykkä rakenne. Komposiittimateriaaleja käyttäen rakenne voidaan valmistaa suoraan toivottuun muotoon, esimerkiksi linja-auton takaosa tai junanvaunu. Rakenteen pieni pinta-alamassa suureen taivutusjäykkyyteen yhdistettynä aiheuttaa usein ääneneristävyysongelman.

2 SANDWICH-LEVYN AALLONNOPEUDEN LASKENTA JA MITTAUS

Ääneneristävyiden kannalta tärkeää levyn poikittaista muodonmuutosta tarkastellaan sandwich-levyssä symmetrisen ja antisymmetrisen aaltoliikkeen avulla. Antisymmetrisen aaltoliikkeen vastaa karkeasti levyn taivutusaaltoa; levyn pinnat värähtelevät neutraaliakselin suhteen samassa vaiheessa. Symmetrisessä aaltoliikkeessä pintojen liike on keskiakselin suhteen peilattu.



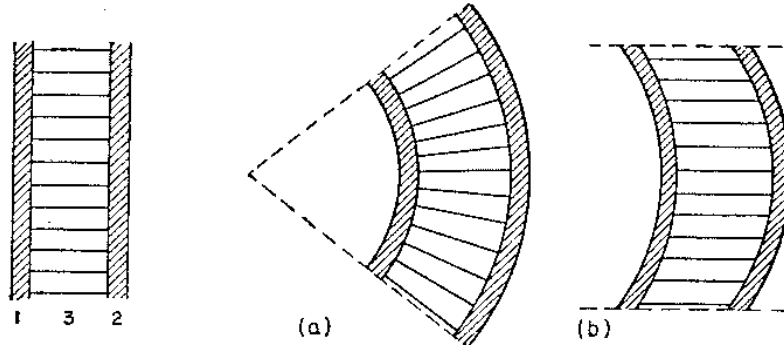
Kuva 1. Antisymmetrisen aalto (vasen) ja symmetrisen aalto (oikea) sandwich-levyssä.

2.1 Sandwich-levyn kuvaus antisymmetrisen aallon avulla

Yksikerrosrakenteen ääneneristävyys mallinnetaan levyn massan ja siinä etenevän taivutusaallon impedanssin perusteella [1]. Saatavaa impedanssilauseketta voidaan edelleen tarkentaa huomioimalla levyn äärellinen koko, reunaehdot ja mahdolliset kytkennät [2]. Sandwich-levy voidaan käsitellä analogisesti yksikerroslevyn kanssa, kun kuvataan sandwich-levyssä etenevän poikittaisaallon nopeus näennäisen, taajuusriippuvan taivutusjäykkyyden $D(f)$ avulla, jolloin saadaan ääneneristävyiden laskennassa tärkeälle levyn kriittiselle taajuudelle f_c esitys:

$$f_c = \left(\frac{c}{2\pi} \right) \frac{k_{plate}^2}{k_{air}} = \left(\frac{c^2}{2\pi} \right) \left(\frac{m}{D(f)} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

missä c on ilmaänen nopeus, m on levyn pinta-alamassa ja k_i on ilmaänen tai levyn poikittaisaallon aaltoluku [3]. Poikittaisaallolla tarkoitetaan taivutus- ja leikkausaallon yhdistelmänä levyssä etenevää aaltoa, katso seuraava kuva 2.



Kuva 2. Tarkasteltavassa kolmikerroksisessa sandwich-levyssä tapahtuva taivutusmuodonmuutos (a) ja leikkausmuodonmuutos (kuva b). Taajuudesta riippuen levyn poikittainen värähtely on taivutus- tai leikkausaallon tai näiden yhdistelmän synnyttämä. Kuva Kurtzen ja Wattersin artikkelista [4].

Sandwich-levyssä etenevän poikittaisaallon nopeus voidaan arvioida laskemalla tai mittaamalla. Kurtze ja Watters esittävät sandwich-levyn klassisen kuvauksen levyn massan, levyn taivutusaallon ja ydinmateriaalin leikkausaallon impedanssien perusteella [4]. Kuvauksen avulla saadaan yhtälö poikittaisaallon nopeuden c_t ratkaisemiseksi:

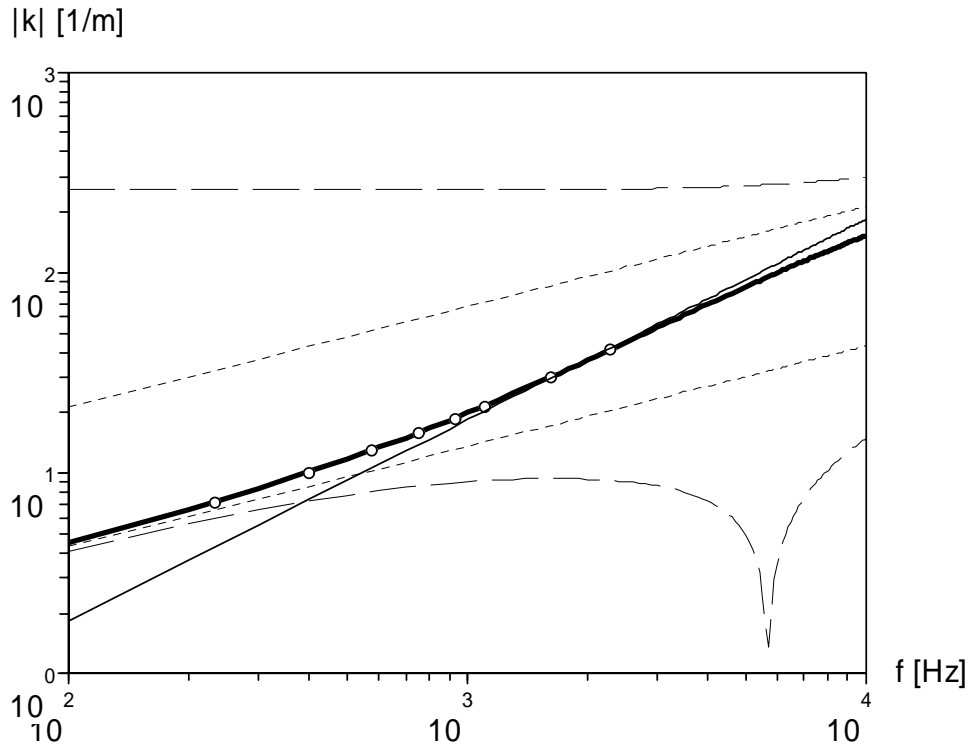
$$\frac{c_s^4}{c_b^4} c_t^6 + c_s^2 c_t^4 - c_s^4 c_t^2 - c_b'^4 c_s^2 = 0, \quad (2)$$

missä c_s on ydinmateriaalin leikkausaallon nopeus, c_b on koko levyn taivutusaallon nopeus ja c_b' on ohuen pintalevyn taivutusaallon nopeus. Molemmat ovat taajuuden funktioita. Yhtälön juuret voidaan ratkaista sopivalla laskentaohjelmistolla.

Nilsson esittää kaksi tapaa sandwich-levyn ääneneristävyyden ja poikittaisaallon etenemisnopeuden mallintamiseksi. Käyttökelpoinen ja uudempi sandwich-levyn variaatio-ongelman ratkaisuun perustuva menetelmä [5] on käytännössä sama edellä esitetyn Kurtzen ja Wattersin muotoilun kanssa. Aiempi Nilssonin teoria [3] mahdollistaa epäsymmetristen pintalevyjen tarkastelun, mutta on laskennallisesti vaikeampi toteuttaa. Symmetrisen rakenteen tapauksessa on edullista käyttää uudempaa muotoilua, koska laskentatulos poikittaisaallon nopeudelle on sama molemmilla menetelmillä, ja vastaa myös Kurtzen ja Wattersin mukaan laskettua.

2.2 Symmetrisen aallon huomioiminen

Edellä kuvattiin sandwich-levy yksikerroslevyn tavoin käyttäytyvänä rakenteena. Kun sandwich-levyn ydin on riittävän paksu suhteessa ytimen jäykkyyteen, syntyy rakenteeseen paksuuuntainen muodonmuutos. Pintalevyt värähtelevät symmetrisesti eri vaiheessa.



Kuva 3. Sandwich-levyn poikittaismuodonmuutoksen aiheuttavan aallon aaltoluvun muutos. Mitattu aaltoluku (o), laskettu aaltoluku (—), ilmaäänen aaltoluku (—). Ohuet katkoviivat kuvaavat levyn muita aaltotyyppjejä. Ylempi vino pisteiviiva kuvaa pintalevyn taivutusaaltolukua, alempi vino pisteiviiva koko levyn taivutusaaltolukua. Nähdään siirtymä koko levyn taivutusvärähtelystä poikittaisvärähtelyn kautta pintalevyn taivutusvärähtelyyn. Sandwich-levyllä on ns. laajennettu koinsidenssi välillä 1000...3000 Hz. Levy on sama kuin kuvassa 4.

Käyttökelpoinen menetelmä symmetrisen aaltoliikkeen aiheuttaman ääneneristävyyden heikkenemisen huomioimiseksi on alun perin Vlasovin kehittämä ns. kaksiparametrimalli [6]. Malli kuvaa elastisen perustan ja sillä lepäävän laatan vuorovaikutusta. Jensen ja Irgens ovat soveltaneet mallia sandwich-palkin ominaistuuksien ja paksuussuuntaisen värähtelyn laskentaan [7]. Wang ja kumpp. ovat soveltaneet mallia edelleen sandwich-levyn ääneneristävyyden laskentaan [8].

Perusajatus on kirjoittaa ydinmateriaalin erottamien pintalevyjä kuvaavien palkkien liikeyhtälöt. Yhtälöparista voidaan erottaa symmetristä ja antisymmetristä liikettä kuvaavat yhtälöt, joiden avulla kirjoitetaan aaltoimpedanssi symmetriselle ja antisymmetriselle aaltoliikkeelle. Näiden avulla ratkaistaan ääneneristävyys.

Kaksiparametrimalli huomioi ydinmateriaalin leikkausmuodonmuutoksen ja puristusjännityksen. Se ei ota huomioon ytimen pitkittäistä liikettä (esim. rotaatio ja translaatio taivutuksessa tai pitkittäisaallon eteneminen ytimessä). Sen vuoksi Vlasov-Jensen-Wang-mallia on käytettävä varoen ohuiden ja jäykkien levyjen mallinnukseen.

2.3 Poikittaisaallon nopeuden mittaaminen

Sandwich-levyn poikittaisaallon nopeus voidaan mitata käyttämällä palkkimaista, kooltaan esimerkiksi 10 cm x 100 cm näytettä. Mittaamalla vapaasti värähtelevän palkin poikittainen värähtelyvaste havaitaan palkin ominaistajuudet. Ominaisajuuden perusteella voidaan laskea palkin taajuusriippuva taivutusjäykkyys klassisen teorian mukaan [3, 5]:

$$D(n) = \frac{4ML^3 f(n)^2}{\pi^2 b(n+0,5)^4}, \quad (3)$$

missä M on palkin massa, L on palkin pituus ja b palkin leveys ja n on ominaismuodon järjestysluku. Taivutusjäykkyyden perusteella voidaan edelleen laskea poikittaisaallon nopeus ja seuraavassa luvussa esitettävällä tavalla ääneneristävyys.

Tekemällä mittaus jatkuvalla herätteellä (tärustin) ja käyttämällä moodianalyysiohjelmistoa saadaan samalla selville palkin muut ominaismuodot ja arvio rakenteen vaimennuksesta. Vaimennusarvio on hyödyllinen mallinnettaessa rakenteen ääneneristävyyttä. Mittaamalla molempien pintalevyjen värähtelyvaste samaan aikaan voidaan saada selville myös symmetrisen aallon olemassaolo, ts. dilataatioresonanssin ilmeneminen.

3 SANDWICH-LEVYN ÄÄNENERISTÄVYYDEN LASKENTA

Yksikerroksisen levyn ääneneristävyys lasketaan taajuuden funktiona esimerkiksi Nilssonin muotoilemalla tavalla [3, 9], kun tunnetaan levyssä etenevän poikittaisaallon nopeus (ts. levyn taajuusriippuva taivutusjäykkyys):

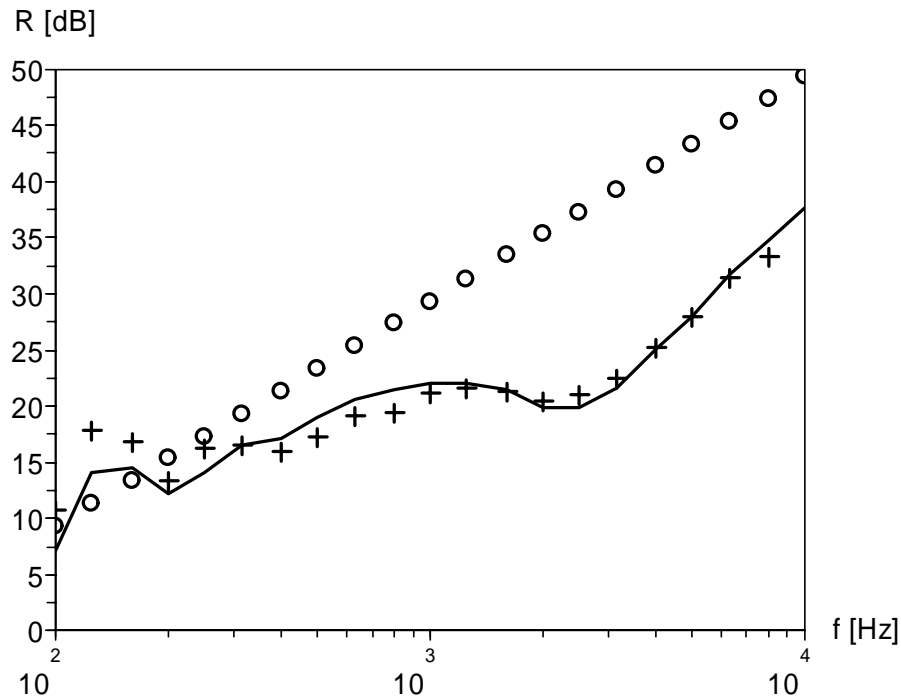
$$R = \begin{cases} 20 \log(mf) - 10 \log(\Gamma \Lambda + G) - 48, & f < f_c \\ 20 \log(mf) + 10 \log\left(\frac{f}{f_c}\right) + 10 \log(\delta) + 5 \log\left[1 - \frac{f_c}{f}\right] - 47, & f > f_c \end{cases}, \quad (4)$$

missä f on taajuus, $\Gamma(f)$ on korjausfunktio levyn äänensäteilylle huomioiden levyn koko suhteessa asennukseen kokoon, funktio $\Lambda(f)$ kuvaa reunaehtojen vaikutusta, funktio $G(f)$ kuvaa resonoivan äänenläpäisyn osuutta ja δ on levyn häviöluku.

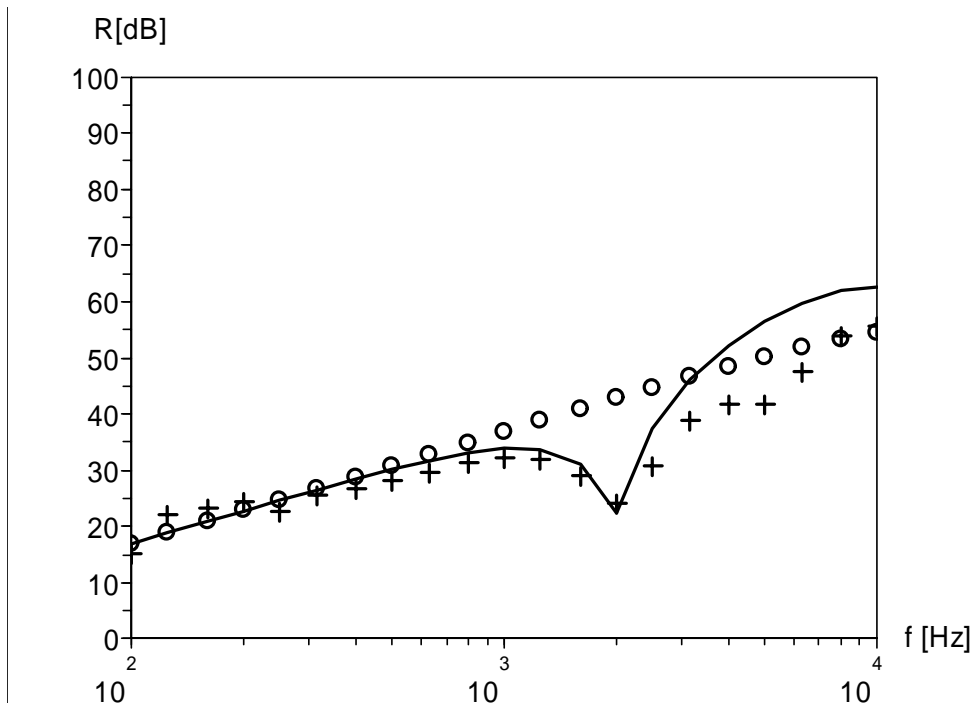
Paksun sandwich-levyn ääneneristävyys lasketaan Wangin artikkelissaan [8] esittämällä tavalla. Ääneneristävyydelle saadaan lauseke suljetussa muodossa, mikä on käytännön laskennan kannalta hyvä asia.

Taulukko 1. Ääneneristävyyden laskennassa käytetyt materiaaliparametrit. Merkintä "lam" tarkoittaa pintalevyä.

	E_{lam} [GPa]	ν_{lam}	ρ_{lam} [kg/m ³]	d_{lam} [m]	E_{ydin} [GPa]	ν_{ydin}	ρ_{ydin} [kg/m ³]	d_{ydin} [m]
kuva 4	22	0,3	1740	0,0015	0,083	0,05	80	0,02
kuva 5	210	0,3	7800	0,0007	0,005	0,45	80	0,08



Kuva 4. Nilssonin mallia käyttäen laskettu ohuen sandwich-paneelin (koko paksuus 23 mm) ääneneristävyyttä. Rakenteen 1,5 mm lasikuitukomposiitti - 20 mm PU-vahto - 1,5 mm lasikuitukomposiitti. Mittaustulos (+), laskettu tulos (-), massalaki (o). Nähdään levyn "laajennettu koinvidenssi" taajuuksilla 1000...3000 Hz.



Kuva 5. Vlasovin-Jensenin-Wangin mukaan laskettu paksun mineraalivilla-ydinsandwichin ääneneristävyyttä. Rakenteen on 0,7 mm teräs - 80 mm mineraalivilla (80 kgm^{-3}) poikittain - 0,7 mm teräs. Mittaustulos (+), laskettu (-), vain antisymmetrinen aalto (o). Nähdään symmetrisen aallon aiheuttama dilataatioresonanssi taajuuksialueella 1000...3000 Hz.

4 KRIITTISEN TAAJUUDEN JA DILATAATION MERKITYS

Kone- ja kuljetusvälineiteollisuuden tuotteissa esiintyvissä sandwich-rakenteissa laajennettu koinsidenssi on dilataatioresonanssia merkittävämpi rakenteen ääneneristävyttä heikentävä tekijä. Rakenteet ovat verraten ohuita; paksuus vaihtelee välillä 20...50 mm. Ytimen kimmo- ja leikkausmoduulin arvo on tyypillisesti $10^7 \dots 10^8$ Pa rakenteen lujuusvaatimuksista johtuen. Tällöin dilataatioresonanssi ilmenee yli 5 kHz, jopa yli 10 kHz taajuuksilla

Rakennuksissa ja laivojen ja junien hyttisovelluksissa käytettävissä sandwich-rakenteissa dilataatioresonanssi voi heikentää rakenteen käytännön ääneneristävyttä merkittävästi. Ydinmateriaalin tyypillinen kimmo- tai leikkausmoduulin suuruus on $10^5 \dots 10^7$ Pa. Ytimen paksuus on yleensä 40...120 mm. Tällöin dilataatioresonanssi ilmenee 300 Hz...3 kHz välisellä taajuusalueella, kun pintalevy on 1 mm teräs taulukkoa 1 mukailen. Pintalevyn kriittisen taajuuden ollessa tyypillisesti yli 5 kHz on sovelluskohteita, tyypillisiä herätteitä ja A-painotusta ajatellen dilataatioresonanssin välttäminen tärkeää hyvää ääneneristävyyteen pyritessä.

Laajennettu koinsidenssi ja dilataatioresonanssi voidaan useimmissa tapauksissa välttää ydinmateriaalin huolellisella valinnalla huomioiden pintalevyjen ominaisuudet ja staattinen lujuusvaatimus. Pahimmassa tapauksessa molemmat osuvat samalle taajuuskaistalle.

5 KIITOKSET

Sandwich-materiaalien vibroakustiikkaan on perehdytty VTT:n rahoittamissa SanKo- ja MaKeMit-hankkeissa ja asiakastoimeksiannoissa. Työtä jatketaan edelleen VTT:n ja EU:n rahoittamassa InMAR-hankkeessa.

LÄHTEET

1. CREMER L, Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall. *Akust Z* **7**(1942)3, 82-103.
2. SHARP B H, *A Study of Techniques to Increase the Sound Insulation of Building Elements - Report WP 73-5*, Wyle Laboratories, El Segundo 1973
3. NILSSON A C, Wave Propagation in and Sound Transmission through Sandwich Plates. *J Sound Vib* **138**(1990)1, 73-94.
4. KURTZE G, WATTERS B G, New Wall Design for High Transmission Loss or High Damping. *J Acoust Soc Am* **31**(1959)6, 739-748.
5. NILSSON E, NILSSON A C, Prediction and Measurement of Some Dynamic Properties of Sandwich Structures with Honeycomb and Foam Cores. *J Sound Vib* **251**(2002)3, 409-430.
6. VLASOV V Z, LEONTJEV U N, *Beams, Plates and Shells on Elastic Foundations*. Israeli Program for Scientific Translations, Jerusalem 1966.
7. JENSEN A E, IRGENS F, Thickness Vibration of Sandwich Plates and Beams and Delamination Detection, *J Intel Mat Syst Struct*, **10**(1999)1 46-55.
8. WANG T, SOKOLINSKY V S, RAJARAM S, NUTT S R, Assessment of Sandwich Models for the Prediction of Sound Transmission Loss in Unidirectional Sandwich Panels. *Appl Ac* **66**(2005) 245-262.
9. NILSSON A C, *Sound Transmission Through Single Leaf Panels*, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg 1974