

Jaksollisen sandwich-rakenteen vibroakustiikasta

Jukka Tanttari, Esa Nousiainen, Samu Aalto ja Tomi Lindroos

Tiivistelmä. Kevyiden sandwich-levyjen ääneneristävyys on huono. Tutkimme jaksollisten pehmeiden ydinmateriaaliraitojen käyttämistä ääneneristävyuden parantamisessa. Raita- ja ruututyypisillä ydinrakenteilla saavutettiin jopa yli 10 dB suurempi TL. Raidoitustekniikka avaa mahdollisuuksia mielenkiintoisten dynaamisten ilmiöiden hyödyntämiseen. Näitä ovat aaltoken-
tän hajottaminen ja suuntaaminen, säteilytehokkuusmuutokset sekä keskitetty dynaaminen käyt-
täytyminen pienillä taajuuksilla.

Avainsanat: vibroakustiikka, ääneneristävyys, kevytrakenne, sandwich, raidoitustek-
niikka

Johdanto

Viime Akustiikkapäivillä esittelimme kevyiden ja jäykkien ja toisaalta paksujen sandwich-rakenteiden vibroakustiikkaan liittyviä ilmiöitä ja niiden mallinnusta. Totesimme, että huolellisella suunnittelulla useimmat ongelmat pystytään välttämään, ja yhdistämään rakenteellisesti lujaan ja valmistusteknisesti edulliseen sandwich-rakenteeseen riittävän hyvä akustinen toimivuus.

Keveiden ja jäykkien, muovikomposiiteista valmistettavien sandwich-rakenteiden käyttö lisääntyy, erityisesti kuljetusvälineiteollisuudessa. Edelleen pätee se, että keveyden, taivutusjäykkyyden ja hyvän ääneneristävyuden yhdistäminen samaan rakenteeseen on tietyllä tavalla ristiriitainen tavoite.

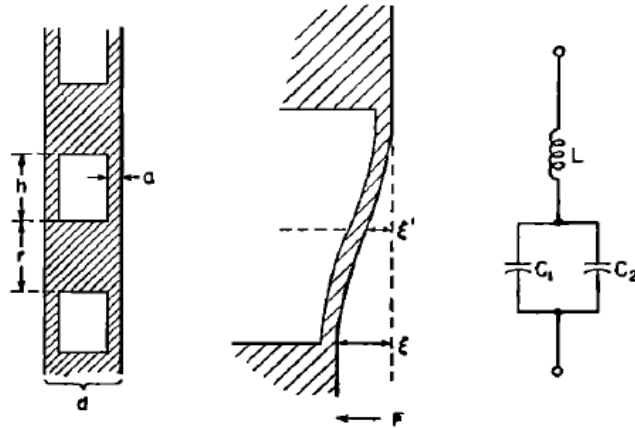
Tässä tarkastelemme jaksollisen rakenteen hyödyntämistä rakenteessa etenevän aaltoliikkeen ohjailuun, muodonmuutoksen kohdistamiseen valittuihin kohtiin ja rakenteen vaimennuksen lisäämiseen. Esittelemme erilaisia jaksollisia rakenteita, näiden mittaus-
tuloksia ja tarkastelemme ilmiöitä mallinnuksen keinoin.

Tässä tarkasteltava jaksollinen rakenne on ohut, kevyt ja taivutusjäykkä sandwich-
levy, kts. Akustiikkapäivät 2005 [1, 2], jonka ydin koostuu jaksottelevasta jäykästä ja löysästä vaahtomuovista, jotka muodostavat raitoja. Sandwich-levyn pintalevyt ovat lasikuitulaminaattia.

Aiempi työ

Jaksollisuuden hyödyntäminen rakenteen akustisten ominaisuuksien muokkaukseen esi-
intyy kirjallisuudessa jo vuonna 1959 Kurtzen ja Wattersin klassisessa artikkelissa [3].

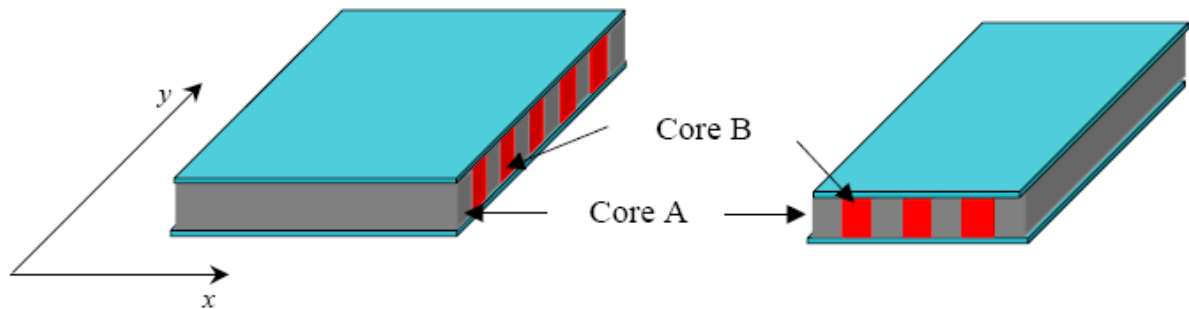
Perusajatus on mahdollistaa leikkausmuodonmuutos valituissa kohdissa rakennetta ja tällä tavoin rajoittaa taivutusosaillon etenemistä.



Kuva 1. Jaksollisen rakenteen kuvaus Kurtzen ja Wattersin artikkelissa [3]

Kurtzen ja Wattersin työssä jaksollisuuden muodostavat ”onkalot” rakenteessa käsitellään tyhjänä ilmapälinä. Onkaloilla ei ole tiettyjä mekaanisia ominaisuuksia.

Sandwich-levyn ytimen raitamainen jaksollisuus esiintyy Mazzarellan ja kumpp. artikkelissa vuonna 2002 [4]. Työssä tarkastellaan aukseettisen (negatiivisen Poissonin luvun eli venytettäessä leviävän) ydinmateriaalin muodostamien raitojen hyödyntämistä komposiiteista tehdyn sandwich-levyn värähtelyn hallintaan ja runkoäänien etenemisen ohjailuun. Työssä ei käsitellä rakenteen akustisia ominaisuuksia, kuten ääneneristävyyttä tai äänen säteilyn tehokkuutta.

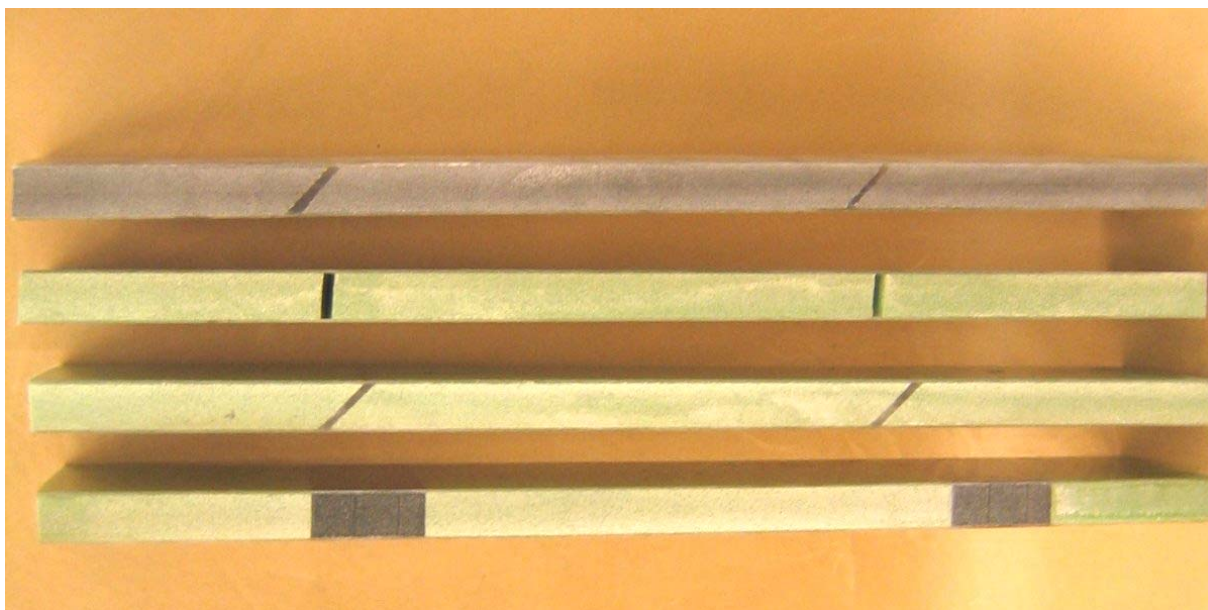


Kuva 2. Mazzarellan tutkima aukseettisen (Core B) ja tavallisen hunajakennon/vaahtomuoviytimen (Core A) jaksottama sandwich-levy [4]

Mazzarella ja kumppanit pystyivät osoittamaan, että aukseettisen ja tavallisen hunajakennon- tai vaahtomuoviydinmateriaalin jaksollisuudella kyetään luomaan rakenteeseen ”varjoalueita”, mihin värähtelyenergia ei etene tehokkaasti. Ainakaan käytetäessä pistemäistä voimaherätettä.

VTT osallistuu EU:n 6. puiteohjelman integroituun tutkimusprojektiin InMAR (Intelligent Materials for Active Reduction) vuosina 2003...2008. Jo päättyneessä työpaketissa ”Novel Passive Material Systems” selvitettiin uusien materiaalien ja valmistustapojen mahdollisuuksia rakenteiden akustisten ominaisuuksien parantamiseksi.

Akustiikkapäivien 2005 jälkeen olemme tutkineet aluksi palkkimaisten näytteiden vibroakustiikkaa hyödyntämällä aiemmissa kuvattuja mittausmenetelmiä [1].



Kuva 3. Jaksollisia palkkinäytteitä, ylhäältä alas: 1) .pehmeän ydinmateriaalin ja elastisen epoksin muodostama jaksollinen ydinrakenne, 2) Kurtzen ja Wattersin hengessä tehty jäykän ydinmateriaalin ja ilmvälän muodostama jaksollinen ydinrakenne, 3) jäykän ydinmateriaalin ja elastisen epoksin muodostama jaksollinen ydinrakenne, 4), jäykän ja löysän vaahtomuovin muodostama jaksollinen ydinrakenne.

Palkkinäytteiden moodianalyysin avulla tehdyn taivutusaallon ja leikkausaallon etenemisnopeuden määrittämisen ja häviöluvun arvioinnin perusteella selvästi potentiaalisimmaksi osoittautui kuvassa 3 alimpana oleva jäykän ja löysän ydinmateriaalin jaksottama sandwich-levy. Tästä materiaaliyhdistelmästä rakennettiin kaksi n. neliömetrin näytelevyä.

Eri ydinmateriaalien muodostaman löysä vaahto-jäykkä vaahto -jakson pituus ei vastoin ennako-odotuksia vaikuttanut merkittävästi palkin vibroakustisiin ominaisuuksiin. Jaksojen pituudeksi valittiin tällä perusteella käytännön toteutuksen kannalta hyvä 50 mm löysä – 250 mm jäykkä vaahto.

Tutkitut näytteet

Kaksi rakennettua jaksollista koelevyä esitetään kuvassa 4. Levyjen koko on 1120 mm x 1120 mm ja paksuus 23 mm. Ensimmäinen näyte on yhteen suuntaan jaksollinen raitapaneeli. Raitapaneelin ytimen jaksollisuus muodostuu 50 mm leveiden löysän vaahtomuovin ja 250 mm leveiden jäykän vaahtomuovin kaistoista.

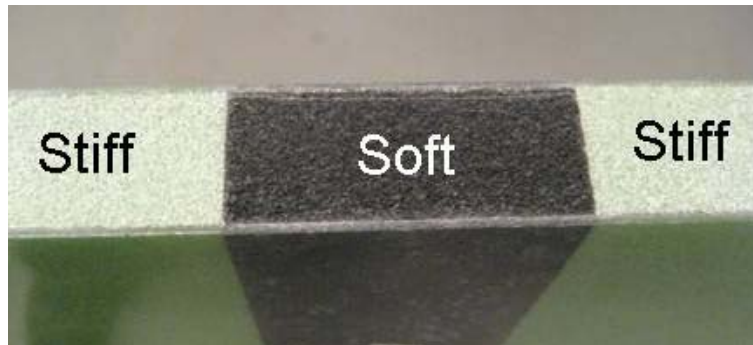
Toinen näyte, ruutupaneeli, on kahteen suuntaan jaksollinen. Materiaalin jako on sama kuin raitapaneelissa: löysän vaahtomuoviraidan leveys on 50 mm ja raitojen erottaman jäykän ydinmateriaalin ruudun koko on 250 mm x 250 mm. Kummankin levyn paino on n. 9,1 kg ja pintamassa 7,2 kg/m².



Kuva 4. Tutkitut jaksolliset paneelit: vasemmalla kirjoittajista Aalto raitapaneelin kanssa, oikealla ruutupaneeli asennettuna kaiuntahuoneen mittausaukkoon ääneneristävyden mittausta varten.

Taulukko 1. Tutkittujen levyjen materiaaliominaisuudet.

Koko	1120 mm x 1120 mm
Pintalaminaatti	2 x 1,5 mm lasikuitu
Ytimen paksuus	20 mm
Laminaattien pinta-alamassa	5,6 kg/m ²
Ytimen pinta-alamassa	1,6 kg/m ²
Paneelin pinta-alamassa	7,2 kg/m ²
Pintalaminaatin materiaali	6-kerroksinen lasikuitumatto, tyhjiöinjisoitu epoksi
Ytimen materiaali	Jäykkä: "Airex" Löysä: "Kaimann"



Kuva 5. Levyn rakenne: jäykän ja löysän ydinmateriaalin kummankin puolen sitoo jatkuva lasikuitupintalaminaatti.

Mittausmenetelmät

Ääneneristävyyden mittaus

Paneelien ääneneristävyys mitattiin tavallista kaiuntahuone-intensiteettimenetelmää käyttäen. Kaiuntahuonemenetelmän lähetyshuoneena oli VTT:n suuri kaiuntahuone Tampereella. Lämpäissyt intensiteetti mitattiin ns. koneakustiikkalaboratorion puolella intensiteettimenetelmällä. Intensiteetti mitattiin 1/12-oktaavikaistoittain ja prosessoitiin myöhemmin 1/3-oktaavikaistamuotoon, tai suoraan 1/3-oktaavikaistoilla ja 6,25 Hz FFT-kaistanleveydellä. Mittaus tehtiin tavallisella 100 Hz...10000 Hz taajuuskaistalla.

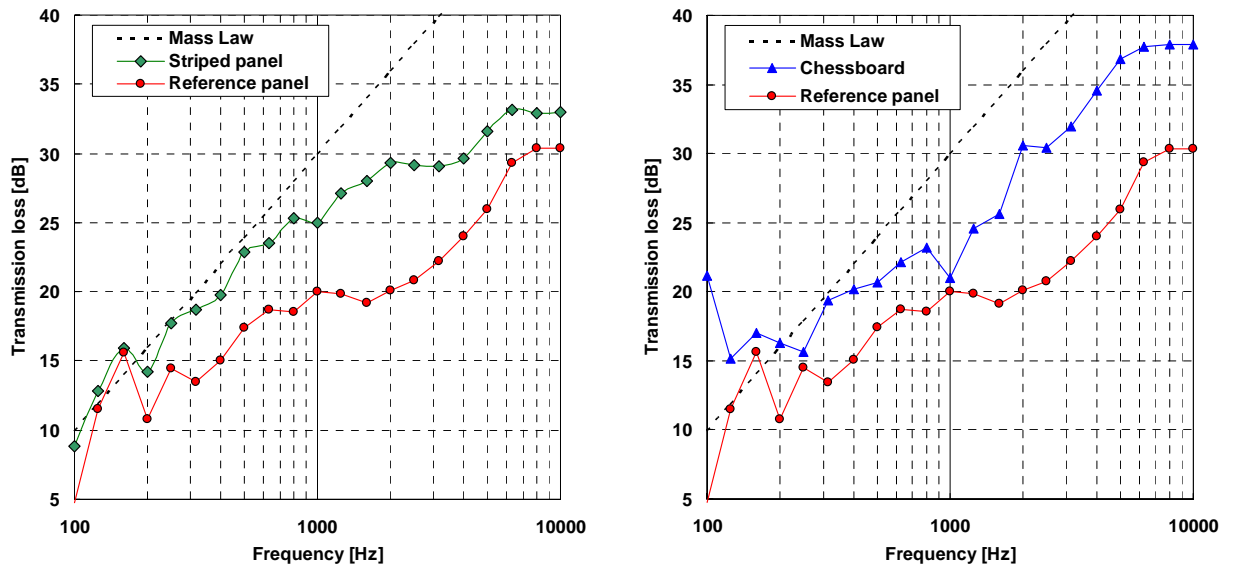
Laserskannaus

Paneelien pinnan värähtelynopeus mitattiin skannaavalla laservibrometrilla. Mittauksen tarkoitus oli visualisoida värähtelykäyttäytymisen ilmiöitä ja havainnollistaa raitojen ja alipaneelien eri vaiheista liikettä.

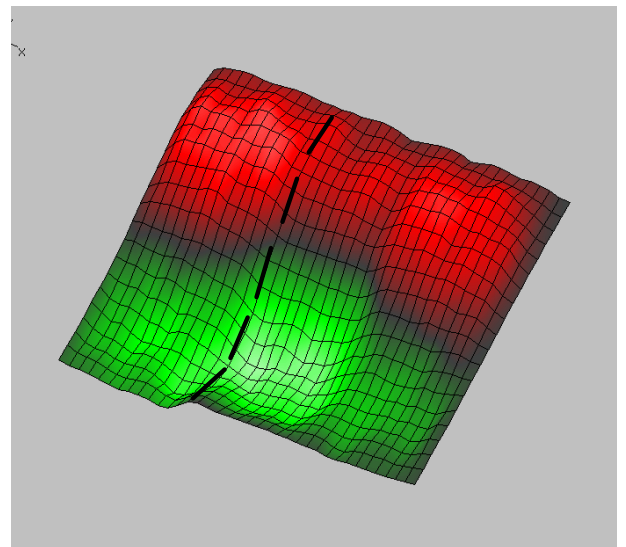
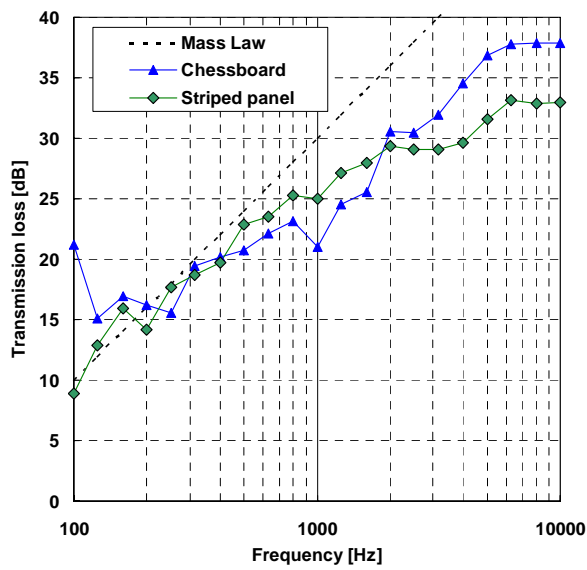
Paneelit kiinnitettiin VTT:n suuren kaiuntahuoneen mittausaukkoon ja herätettiin akustisella kohinalla. Skannaus tehtiin ruudukkokuvailla, pisteiden lukumäärän ollessa 740.

Tulokset

Päätuloksina esitetään ääneneristävyyden mittaustulokset ja havainnollistuksena laserskannauksella saatu kuva pinnan värähtelystä raitapaneelin ominaistaajuudella. Vertailupaneeli on Akustiikkapäivillä 2005 esitelty ”referenssipaneeli” mikä kuvaa tyypillistä, kevyttä ja jäykkää komposiittisandwichlevyä [1, 2]. Referenssipaneelissa on jäykkä ”Airex”-ydin.



Kuva 6. Raitapaneelin (vasemmalla) ja ruutupaneelin (oikealla) vertailu referenssipaneeliin ja massalakiin. Nähdään jaksollisuudella saavutettava selkeä parannus ääneneristävyydessä.



Kuva 7. Paneelien välinen vertailu (vasemmalla) ja raitapaneelin värähtelynopeus 179 Hz taajuudella, kun herätteenä on akustinen kohina. Raidan (kts. kuva 5) sijainti hahmoteltu katkoviivalla.

Johtopäätökset

Jaksollisuutta käyttäen pystytään parantamaan akustisesti huonon sandwich-levyn ääneneristävyyttä jopa yli 10 dB laajalla taajuuskaistalla. Raita- ja ruutukuvion välillä ei havaita suurta eroa. Raitapaneelin eristävyys on hyvin jatkuvaa, selvä ominaisuus havaitaan 80 Hz...100 Hz alueella. Ruutupaneelin eristävyys on raitapaneelia heikompi n. 1 kHz lähellä. Tämän tarkkaa syytä ei vielä pystytä sanomaan. Ruutupaneelin alin ominaistaajuus on raitapaneelia alempi, ollen n. 65 Hz.

Jaksollisten rakenteiden käyttö tuo sandwich-levyjen akustiikkaan paljon uusia, mielenkiintoisia ilmiöitä ja mahdollisuuksia; esimerkiksi värähtelyenergian ohjailu rakenteessa haluttuun suuntaan tai aktiivisten järjestelmien optimaalialustan räätälöinti. Tämä luo tarpeen kehittää ja soveltaa edistyksellisiä mallinnusmenetelmiä levyjen vibroakustiikan ennakointiin ja optimointiin. Varsinaisessa esitelmässämme esitämme näkyviä jaksollisuuden ja muuttuvien materiaaliominaisuuksien tuomiin ilmiöihin ja mahdollisuuksiin.

Lähteet

1. Nousiainen E & Tanttari J, *Kriittisen taajuuden ja dilataatioresonanssin vaikutus sandwich-levyn ääneneristävyyteen*, Akustiikkapäivät 2005 Kuopio, Akustinen Seura ry, Espoo 2005
2. Tanttari J & Nousiainen E, *Sandwich-levyrakenteen SEA-mallinnuksesta*, Akustiikkapäivät 2005 Kuopio, Akustinen Seura ry, Espoo 2005
3. Kurtze U & Watters G, *New wall design for high transmission loss or high damping*, J Acoust Soc Am, 31(6):739–748, June 1959
4. Mazzarella L et al, *Passive control of vibration and wave propagation in sandwich plates with periodic auxetic core*, FEMCI Workshop 2002, May 23, 2002. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.

Jukka Tanttari, Samu Aalto ja Tomi Lindroos
VTT
PL 1300 / Tekniikankatu 1
33101 TAMPERE
jukka.tanttari@vtt.fi

Esa Nousiainen
Wärtsilä Finland Oy
Power Plants
PL 252 / Tarhaajantie 2
65101 VAASA