

ÄÄNITUNTUMASOITTIMEN AKUSTINEN MALLINTAMINEN JA SIMULOINTI

Jukka Linjama¹, Seppo Uosukainen², Tommi Immonen¹, Timo Avikainen²

¹ Flexound Systems Oy
Finnooniitynkuja 4
02270 ESPOO
etunimi@flexound.com

² Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Rakennedynamiikka ja vibroakustiikka
PL 1000
02044 VTT
etunimi.sukunimi@vtt.fi

Tiivistelmä

Flexound Systems Oy:n kehittämän uuden äänentoistoratkaisun, äänituntumasoitin, akustista toimintaa on mallinnettu numeerisella simulointimallilla. Laite on kuulokkeen ja kaiuttimen toiminnan väliin sijoittuva moniaistinen, pehmeä äänentoistoratkaisu, joka mahdollistaa äänen aistimisen pinnan värähtelynä ja laadukkaan äänentoiston lähikentässä.

Ratkaisun ydin on elastinen värinäelementti EVETM, kerroksittainen häviöllinen levyrakente. Rakenteen optimointi on haastavaa, koska elementin toiminnalle olennaiset värähtelevät huokoiset kerrokset sekä tuovat häviöitä että välittävät energiaa. Mallinnus toteutettiin 2D-aksiaalisymmetrisellä geometrialla Comsol Multiphysics -ohjelmistolla. Mallilla tehdyillä simuloinneilla oli tarkoituksena selvittää yksinkertaistetun EVE-elementin avulla, mitä vaikutuksia herätelevyllä ja sen pintaan sijoitetulla värähtelevällä absorptiomateriaalilla on vasteeseen lähikentässä. Tulokset osoittavat, että absorptiomateriaalin akustinen toiminta tasoittaa elementin jäykän kappaleen säteilyn maksimin ja tasoittaa vastetta kautta koko tarkastellun taajuusalueen jopa niin, että joillakin taajuusalueilla vaste kasvaa absorptiomateriaalin vaikutuksesta. Lisäksi absorptiomateriaalin akustinen toiminta korostaa herätteestä suoraan eteenpäin lähtevää ääntä.

1 JOHDANTO

Suomalainen Flexound Systems on kehittänyt uudenlaisen, äänituntumasoitimeksi kutsutun äänentoistoratkaisun. Laite on kuulokkeen ja kaiuttimen toiminnan väliin sijoittuva kokonaisvaltainen äänentoistoratkaisu, joka mahdollistaa moniaistisen, laajennetun kuunteluelämyksen: lähikenttäkuuntelun ja äänen tuntemisen pinnan värähtelynä. Innovaation pohjalle on kehitetty kaksi tyynymäistä tuotetta, Taikofon –äänituntumasoitin lasten terapiaikäyttöön ja HUMU Smart Cushion kuluttajamarkkinoille (kuva 1).

Ratkaisun ydin on elastinen värinäelementti EVE™, kerroksittainen häviöllinen levyrakente. Elementin vibroakustiset ominaisuudet määrittävät äänensäteilyn lähi- ja kaukokenttään, sekä pinnassa tuntuvan värähtelyn. Rakenteen akustisen suorituskyvyn kuvaaminen ja optimointi on haastavaa, koska värähtelevät huokoiset kerrokset sekä tuottavat akustisia häviöitä että välittävät energiaa. Elementissä huokoinen absorptiomateriaali toimii siis sekä ilmaäänentä välittäjänä mekaanisen värähtelyn välittäjänä. Oikein mitoitettulla rakenteella saavutetaan hyvä hyötysuhde ja äänenlaatu. Käytetyllä ohjelmistoversiolla ei ollut olemassa tähän tarkoitukseen parhaiten soveltuvaa simulointimallia. Materiaaliominaisuuksia ei toistaiseksi tunneta kunnolla, mikä osaltaan on estänyt kehittyneempien simulointimallien käytön.



Kuva 1. HUMU Smart Cushion ja Taikofon –äänituntumasoitin.

2 YLEISTÄ COMSOL-OHJELMASTA

COMSOL Multiphysics on elementtimenetelmään (FEM) perustuva laskentaohjelmisto joka tarjoaa suhteellisen laajan mahdollisuuden monifysikaalisten ratkaisujen samanaikaiseen laskemiseen ja analysointiin. Mukaan voi liittää perinteisen rakennemekaniikan lisäksi lämmönhallintaa, virtausdynamiikkaa, akustiikkaa, sähkömagneetiikkaa, MEMS sovelluksia jne.

Mallinnuksessa käytettävät parametrit voidaan lisätä jo heti mallinnuksen alussa parametrilistaan, jolloin laskentamallia on helppo päivittää muuttamalla niiden arvoja. Parametreja hyväksikäyttäen voidaan helposti parametripyyhkäisyllä tehdä herkkyyksianalyysejä missä lasketaan ja tulostetaan annettujen rajoitusten sisällä valittuja parametreja esimerkiksi jonkin toisen muuttujan funktiona. Ratkaisija suorittaa laskuiteraatioita niin kauan, kunnes tulos on annetun virhemarginaalin sisällä. Eräs ohjelmiston merkittävä etu on sen avoimuus, kaikki laskentayhtälöt ovat käyttäjän luettavissa ja tarvittaessa muokattavissa, kunhan vain tietää mitä on tekemässä. Materiaalikirjastossa on mukana yleisimpien insinööri-sovelluksissa käytettyjen materiaalien parametrit, mutta sinne on helppo käyttäjän lisätä materiaali-parametreja.

Analysoitavaa rakennetta kuvaava geometriamalli voidaan luoda ohjelmiston omilla mallinrakennustyökaluilla (kuten tässä työssä on tehty). Vaihtoehtoisesti ulkopuolinen geometria voidaan lukea yleisemmissä CAD formaateissa. Monimutkaisemmilla geometrioilla geometriamallin luominen on sujuvampaa varsinaisilla CAD ohjelmilla.

Samaan tapaan elementtimalli voidaan verkottaa ohjelmiston omalla verkottajalla (kuten tässä työssä on tehty), tai lukea sisään ulkopuolinen verkko Nastran-formaatissa. Laskentaverkon tiheydellä on suuri merkitys laskenta-ajan pituuteen. Akustisissa laskentatapauk-

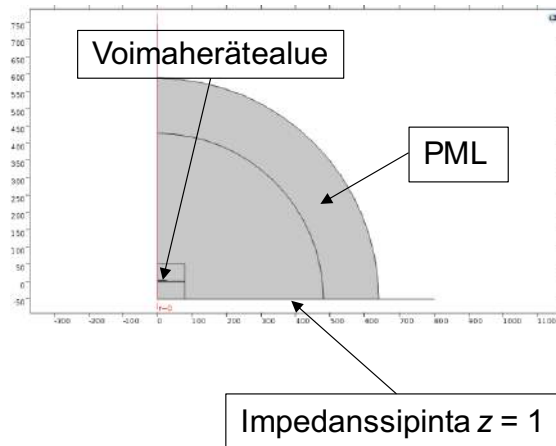
sisä verkon tiheysvaatimus kasvaa mentäessä suuremmille äänitaajuuksille, rakenneanalyysissä on käytettävä taas paikallisia tihennyksiä liitosten ja geometriaepäjatkuvuuskohtien lähellä.

3 VIBROAKUSTINEN MALLINNUS JA SIMULOINTI

Äänituntumasoitimen akustista toimintaa mallinnettiin ensin analyttisesti pelkän herätelevyn värähtelytarkastelulla, ja sitten numeerisesti Comsol Multiphysics –ohjelmalla, versiolla 5.2a. Tässä esityksessä kuvataan simulointituloksia ideaalitapauksessa, jossa yksinkertaistettu värähtelyheräte säteilee vapaana tai häviöllisen huokoisen materiaalikerroksen kautta lähikenttään.

3.1 Malli

Mallinnus toteutettiin 2D-akσιαalisymmetrisellä geometrialla. Lähteenä oli halkaisijaltaan 160 mm herätelevy, jonka herätteenä oli sylinterimäinen viivalähde. Laskennan geometriana oli puolipallo säteeltään 640 mm, jonka uloin, 160 mm paksu kerros muodosti PML-alueen (Perfectly Matched Layer) kuvan 2 mukaisesti. PML-alue eliminoi laskennan rajapinnan takaisineijastukset [1, 2].



Kuva 2. Laskennan geometria.

Absorptiomateriaalin akustinen toiminta mallinnettiin Delany-Bazley-Miki -mallilla [3]. Comsolissa löytyy myös kehittyneempiä ns. jäykkärunkomalleja aina JCAPL-malliin saakka (Johnson–Champoux–Allard–Pride–Lafarge) [4], mutta niitä ei käytetty tarvittavien parametrien puutteesta johtuen. Absorptiomateriaalin mekaanisen liikkeen välityskyvyn arvoimiseksi se mallinnettiin myös elastisena väliaineena. Comsolissa löytyy myös Biotin malli ”Poroelastic Waves” -fysiikasta, jolla absorptiomateriaalin ääni- ja värähtelykäyttäytymistä voi hallita, mutta siihen ei ole sisällytetty kaikkia tarvittavia parametreja. Yksinkertaisimman jäykkärunkopohjaisen JCA-mallin (Johnson–Champoux–Allard) [4]

mukaisista parametreista puuttuvat viskoottinen ja terminen karakteristinen pituus. Kyseiseen fysiikkaan on uudemmassa Comsolin versiossa 5.3 sisällytetty mainitut parametrit. Biotin malliin voi tarvittaessa sisällyttää kaikki akustiset jäykkärunkomallin parametrit aina JCAPL-malliin asti [5, 6, 7].

3.2 Simulointi

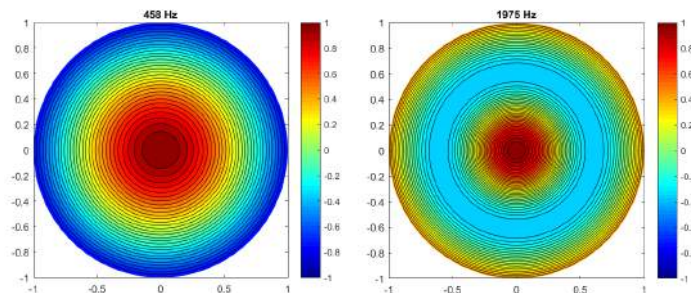
Mallilla tehdyillä simuloinneilla oli tarkoituksena selvittää yksinkertaistetun EVE-elementin avulla, mitä vaikutuksia herätelevyllä ja sen pintaan sijoitetulla värähtelevällä absorptiomateriaalilla on vasteeseen. Erityisesti tutkittiin myös kalvopinnoitetun absorptiomateriaalin värähtelyn vaikutusta syntyvään äänikenttään.

Simuloinneilla selvitettiin värähtelyä ja äänikentän jakaumia vapaassa kentässä ja taajuusvastetta (äänenpaine, hiukkasnopeus, impedanssi) 100 mm etäisyydellä herätelevystä symmetria-akselilla (kuviteltu korvan sijaintipiste). Lisäksi taajuusvastesuureita (äänenpaine, värähtelynopeus, impedanssi) simuloitiin muutamissa pisteissä herätelevyn pinnalla.

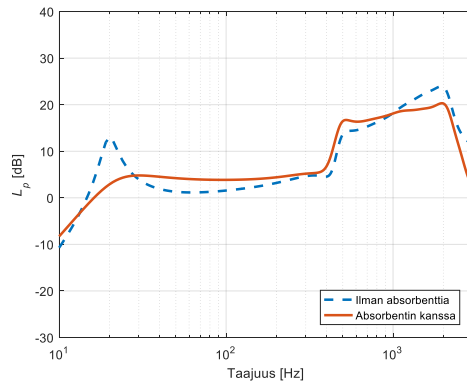
Aluksi simuloitiin pelkän EVE-elementin herätelevyn tuottama värähtelyjakauma ja äänikenttä. Sen jälkeen simuloitiin absorptiomateriaalin akustista vaikutusta elementin tuottamaan äänikenttään. Lopuksi simuloitiin absorptiomateriaalin mekaanisen liikkeen välityksellä kalvopinnoitukselle ja sen vaikutusta äänikenttään.

4 TULOKSIA

Simulointitulokset käyttäjän korvan kohdalla näyttävät, että pelkän herätelevyn vasteessa on maksimit jäykän kappaleen ominaistajuudella (20 Hz) sekä levyn kahdella alimmalla pyörähdyssymmetrisellä ominaismuodolla (kuva 3). Absorptiomateriaalin akustinen toiminta tasoittaa jäykän kappaleen maksimin ja tasoittaa vastetta kautta koko tarkastellun taajuusalueen jopa niin, että joillakin taajuusalueilla vaste kasvaa absorptiomateriaalin vaikutuksesta (kuva 4). Lisäksi absorptiomateriaalin akustinen toiminta korostaa herätteestä suoraan eteenpäin lähtevää ääntä.

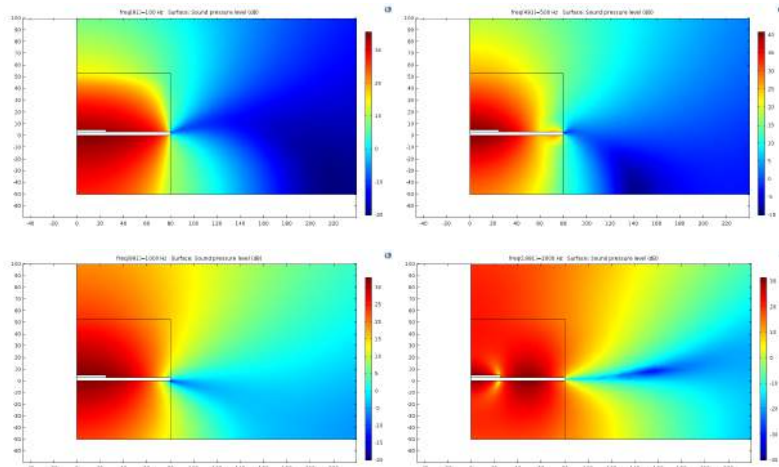


Kuva 3. Mallinnetun herätelevyn kaksi alinta pyörähdyssymmetristä ominaismuotoa.



Kuva 4. Herätelevyn tuottama äänenpainetaso korvan kohdalla taajuuden funktiona ilman absorpenttia ja absorbentin akustinen toiminta huomioiden.

Kuvassa 5 on esitetty herätelevyn tuottama äänenpainetasojakauma lähikentässä neljällä eri taajuudella, kun absorbentin akustinen toiminta otetaan huomioon.



Kuva 5. Herätelevyn tuottama äänenpainetasojakauma lähikentässä, kun absorbentin akustinen toiminta otetaan huomioon, taajuudet 100, 500, 1000 ja 2000 Hz.

Kalvopinnoitetun absorptiomateriaalin värähtely tuottaa jäykän kappaleen ominaistaajuuden ja herätelevyn ensimmäisen pyörähdyssymmetrisen muodon ominaistaajuuden välillä enemmän ääntä suunnaten sitä suhteessa enemmän viistoon kuin varsinainen herätelevy ilman huokoisia materiaalikerroksia.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vibroakustinen mallinnus ja simulointi mahdollistaa nopeamman kehityssyklin vaativan akustisen järjestelmän tuotekehityksessä. Mallinnuksen mahdollisuuksia ja haasteita kuvattiin ideaalisella esimerkkitapauksella, joka jäljittelee äänituntumasoitimen vibroakustista toimintaa.

Äänen ja värähtelyn yhtäaikaaisesti hallitsemaa Biotin mallia, joka sisältäisi absorbentin akustiset jäykkärunkomallin parametrit, ei käytetyllä ohjelmistoversiolla ollut olemassa. Jotta kehittyneemmät simulointialgoritmit saadaan käyttöön, tarvitaan mallituksen lähtötiedoiksi oikeanlaiset ja riittävän tarkat materiaaliparametrit. Tässä työssä saatiin käytännön tietämystä äänituntumasoitimen suorituskyvyn mallinnuksen perusproblematiikasta, ja seuraava askel ennen täsmällisempää 3D-mallitusta on selvittää materiaaliominaisuuksia mittauksin.

VIITTEET

- [1] Berenger J-P, A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *J. Comp. Phys.* 114(1994), 185–200.
- [2] Berenger J-P, Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *J. Comp. Phys.* 127(1996), 363–379.
- [3] Miki Y, Acoustical properties of porous materials – modifications of Delany-Bazley models, *J. Acoust. Soc. Jpn* 11(1990)1.
- [4] Perrot C, Chevillotte F, Hoang M T, Bonnet G, Bécot F-X, Gautron L, Duval A, Microstructure, transport, and acoustic properties of open-cell foam samples: Experiments and three-dimensional numerical simulation, *J. Appl. Phys.* 111(2012), 014911.
- [5] Allard J F, Atalla N, *Propagation of Sound in Porous Media*, Chichester: John Wiley & Sons, 2009.
- [6] Lafarge D, The equivalent fluid model, In: Bruneau M, Potel C (editors), *Materials and Acoustic Handbook*, London: ISTE Ltd, 2009.
- [7] Uosukainen S, *Multi-scale computation of sound absorbing materials*, Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Research Report VTT-R-05212-16, 2016.