

KUORMAAJAN OHJAAMON ÄÄNIKENTÄN MALLINNUKSEN KYTKETTYLLÄ MENETELMÄLLÄ

Ari Saarinen, Seppo Uosukainen

VTT, Äänenhallintajärjestelmät

PL 1000, 02044 VTT

Ari.Saarinen@vtt.fi, Seppo.Uosukainen@vtt.fi

1 JOHDANTO

Esityksessä tarkastellaan äänikentän numeerisen mallintamisen mahdollisuuksia FEM-laskentaan ja kehitettyyn absorptio laskentaohjelmaan perustuvilla mallinnustyökaluilla. Laskentaesimerkinä esitetään kuormaajan ohjaamon äänikentän käyttäytymistä kuljettajan pään kohdalla mitoitettun absorbenttirakenteen eri sijoitusvaihtoehdoilla.

Mallinnuksessa VTT:llä kehitetyn absorptiosuhteen analyttisestä laskentaohjelmasta saatu taajuudesta riippuva kompleksinen impedanssireunaehto on kytketty 3D-akustisen äänikentän FEM-perustaiseen laskentaan muokkaamalla FEM-ohjelmasta generoitua koodia siten, että laskentaohjelmat on voitu kytkeä toisiinsa. Ratkaistava yhtälöryhmä akustiselle alialueelle ja sen reunaehdolle on

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = Q \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{Z_a} \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -\left(\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_w} \right) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

missä kompleksisuureet $p(\vec{x}, t)$ on äänenpaine, c äänennopeus, t aika, $Q(\vec{x}, t)$ on äänilähteen voimakkuus, ρ ilman tiheys, \vec{n} pinnan normaalin suuntainen yksikkövektori, $w(\vec{x}, t)$ pinnan poikkeama, $Z_w(\vec{x}, t)$ joustavan pinnan ominaisimpedanssi ja $Z_a(\vec{x}, t)$ absorbentin ominaisimpedanssi, joka ratkaistaan analyttisesti ja jota käytetään elementtimallin reunaehtona [1].

Tässä esityksessä kuvattu työ on tehty ABSMAT projektin osaprojektissa “Absorptiomateriaalien ja – rakenteiden generinen soveltaminen” [2]. Projektin yhtenä tavoitteena oli selvittää absorptiorakenteisiin liittyviä vibroakustisen mallinnuksen mahdollisuuksia ja rajoituksia pienhköissä tiloissa. Näitä mahdollisuuksia havainnollistaa tässä esityksessä esimerkkinä oleva mallinnuskohde.

2 ESIMERKKILASKENTA: KUORMAAJAN OHJAAMO

Mallinnettavana kohteena on ohuesta teräslevyistä ja lasipinnoista valmistettu ohjaamorakenne (kuva 1). Ohjaamon leveys on 90 cm, syvyys 100/120 cm ja korkeus 160 cm. Ohjaamossa istuu kuljettaja, jonka havaitsemaa äänenpainetasoa simuloidaan. Äänikentän herättää ohjaamon sisälle asennettu ympärisuuntaava pistelähde.



Kuva 1. Mallinnettavan kuormaaajan ohjaamo.

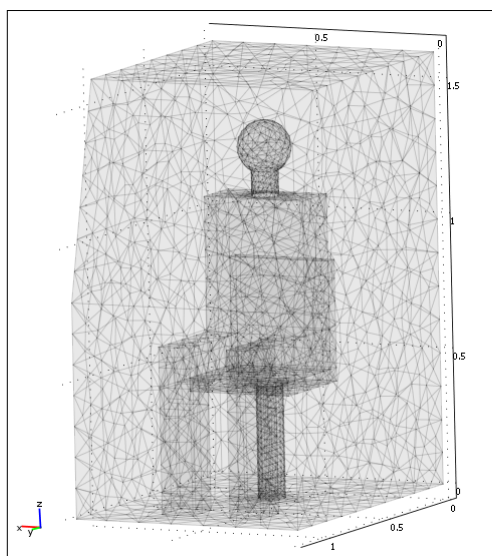
3 LASKENTAMALLI

Ohjaamon rakenne- ja vibroakustinen malli luotiin COMSOLin multifysiikkamallina, jolla on mahdollista tutkia kolmiulotteisen rakenteen kytkettyä vibroakustista käyttäytymistä rakenteen ollessa kosketuksissa yhden tai useamman fluidin kanssa sekä mekaanisesti ja/tai akustisesti kuormitettuna [3].

2.1 Rakenne- ja vibroakustinen malli

Ohjaamon laskennallisen rakennemallin geometria vastaa vertailukohteena toimivan ohjaamon keskipinnan dimensioita. Rakennemalli sisältää myös ohjaamossa istuvan henkilön ja istuimen. Ohjaamon seinämät muodostuvat noin 2000 lineaarisesta kuorielementtistä, kuljetajan noin 4000 lineaarisesta tetraedrielementistä ja istuin vastaavasti noin 2500 elementistä.

Sisätilan vibroakustinen fluidimalli rakennettiin noin 22500 lineaarisesta tetraedrielementistä. Vapausasteita rakenne- ja vibroakustisessa mallissa on kaikkiaan noin 67200 kappaletta (kuva 2).



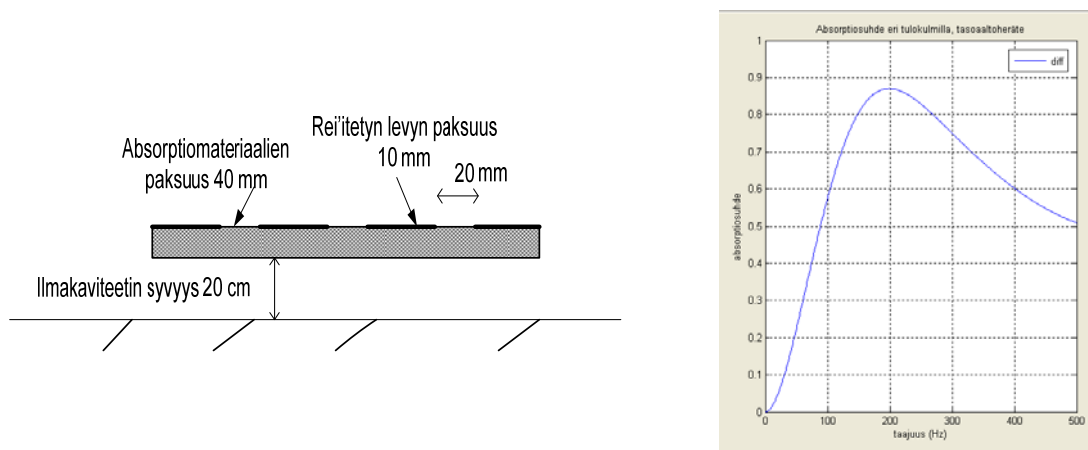
Kuva 2. Rakennemallin elementtiverkko.

2.2 Absorbtiomalli

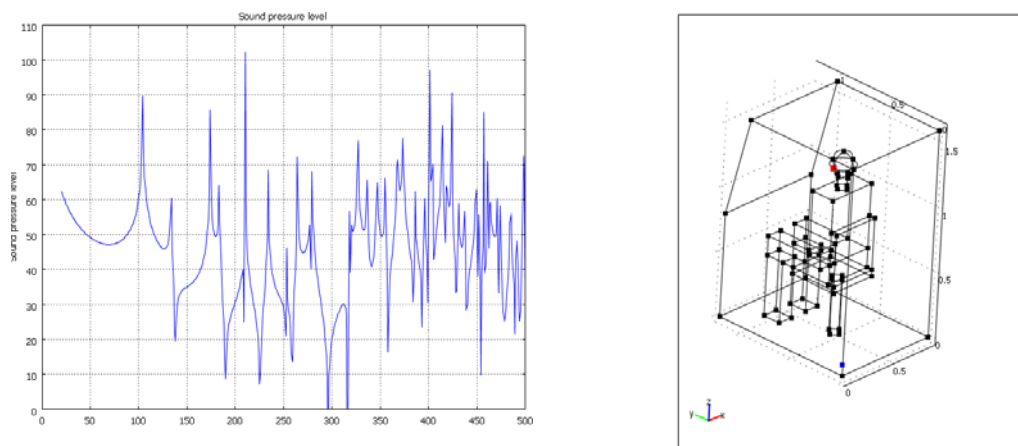
Absorbenttirakenteen absorptio laskenta perustuu siirtojohtoyhtälöihin [4]. Laskennan alussa määritellään asennusalueen kuormitusimpedanssi. Alimman kerroksen etupinnalta näkyvä akustinen ominaisimpedanssi lasketaan ko. kerroksen parametrien ja kuormitusimpedanssin avulla. Seuraavan kerroksen etupinnalta näkyvä akustinen ominaisimpedanssi lasketaan ko. kerroksen parametrien ja edellä määrätyn akustisen ominaisimpedanssin avulla. Edellä oleva askel toistetaan, kunnes päästään koko rakenteen etupinnalle. Koko rakenteen etupinnan akustisen ominaisimpedanssin avulla on mallissa mahdollista laskea myös rakenteen heijastuskerroin ja tämän avulla edelleen absorptiosuhde, jota on hyödynnetty tarkasteltavan absorbentin absorptiosuhteen laskennassa (kts. kuva 3).

2.3 Absorbenttirakenne

Ohjaamoon asennetun absorbentin rakenne ja absorptiosuhde on esitetty kuvassa 3. Absorbtiomateriaalin ominaisvirtausvastus on 10000 Ns/m^4 ja reikä-pinta-ala suhde 0,09. Absorbtiomateriaalin ominaisuudet on laskettu Delany-Bazleyn mallilla, johtuen tarkastelumateriaalista [5]. Vaihtoehtoinen menetelmä mallissa on käyttää Biotin menetelmää [6,7]. Ohjaamon äänenpainetaso ilman absorbenttia kuljettajan vasemman korvan kohdalla on esitetty kuvassa 4.



Kuva 3. Ohjaamoon asennetun absorbentin rakenne ja absorptiosuhde.

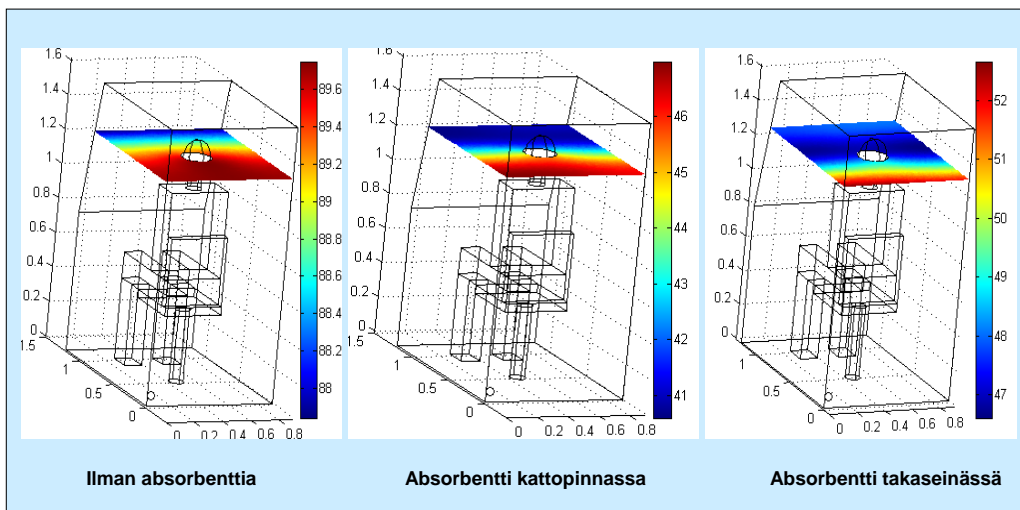


Kuva 4. Äänenpainetaso ohjaamossa kuljettajan vasemman korvan kohdalla ilman absorbenttia (ohjaamon pinnat mallinnettu akustisesti koviksi).

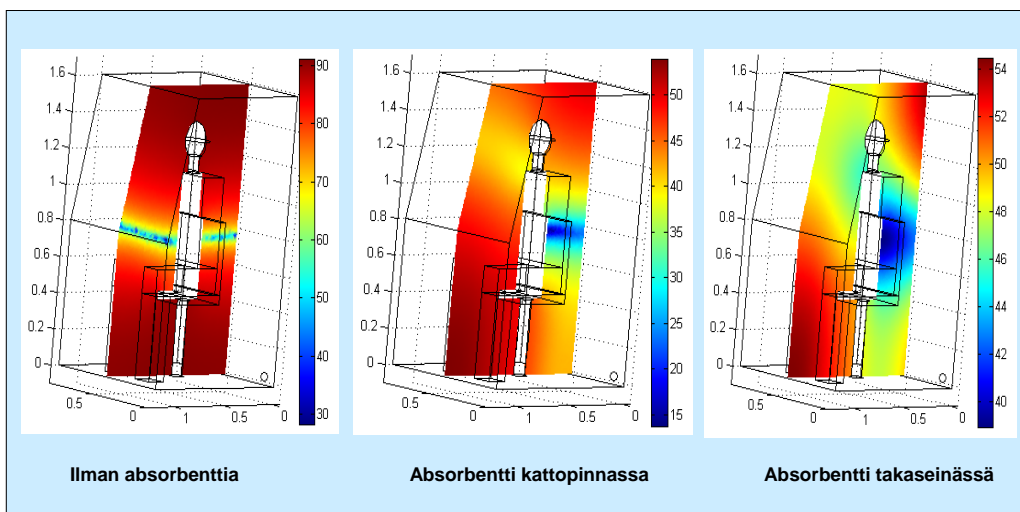
3 LASKENTATULOKSET

Mallinnettava taajuuskaista on 20 – 500 Hz ja laskenta on suoritettu 1 Hz taajuusresoluutiolla. Ohjaamoon asennettu absorbentti on mitoitettu siten, että se vaimentaa tilan äänitasoa erityisesti 200 Hz taajuudella kuljettajan korvien kohdalla. Ohjaamon muut pinnat on mallinnettu esimerkkitarkastelussa akustisesti koviksi, jotta absorbenttin vaikutus sijainnin vaikutus on mahdollisimman selvästi havaittavissa.

Kun absorbentti asennetaan ohjaamoon, se vaikuttaa äänikentän äänenpaineen jakaumaan ja äänitasoihin taajuuksilla, jotka riippuvat absorbenttin absorptiosuhteesta, rakennepintojen akustisista ominaisimpedansseista, ohjaamon geometriasta ja ominaismuotojakaumasta. Ku-
vissa 5 ja 6 on esitetty äänenpainetasojakaumat 104 Hz herätetaajuudella kuljettajan korvien muodostamilla symmetriatasoilla, kun ohjaamoon ei ole asennettu absorbenttia ja kun absorbentti sijaitsee eri rakennepinnoilla.

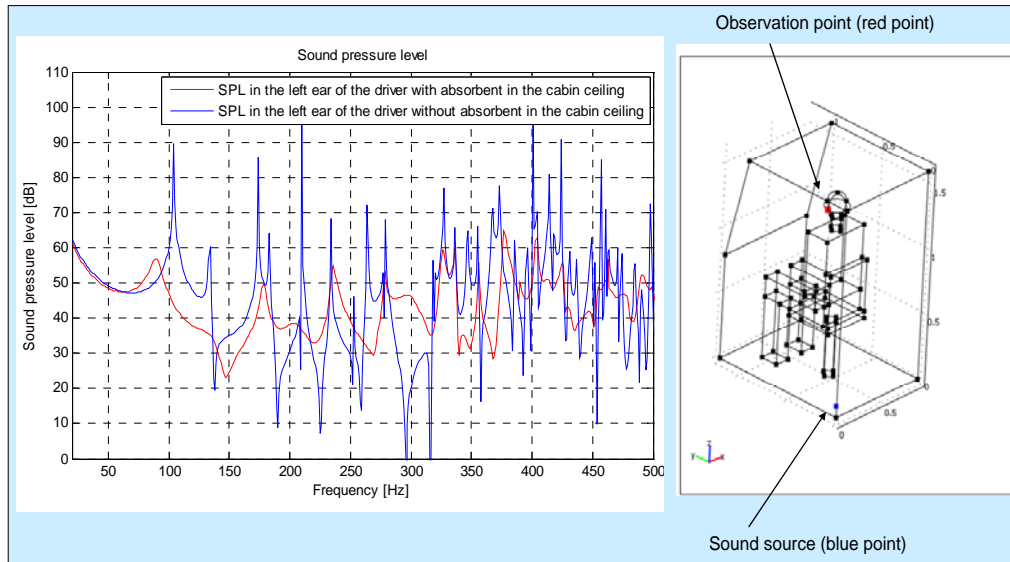


Kuva 5. Äänenpainetasojakauma kuljettajan korvien kautta muodostuvalla symmetriatasolla 104 Hz:llä.

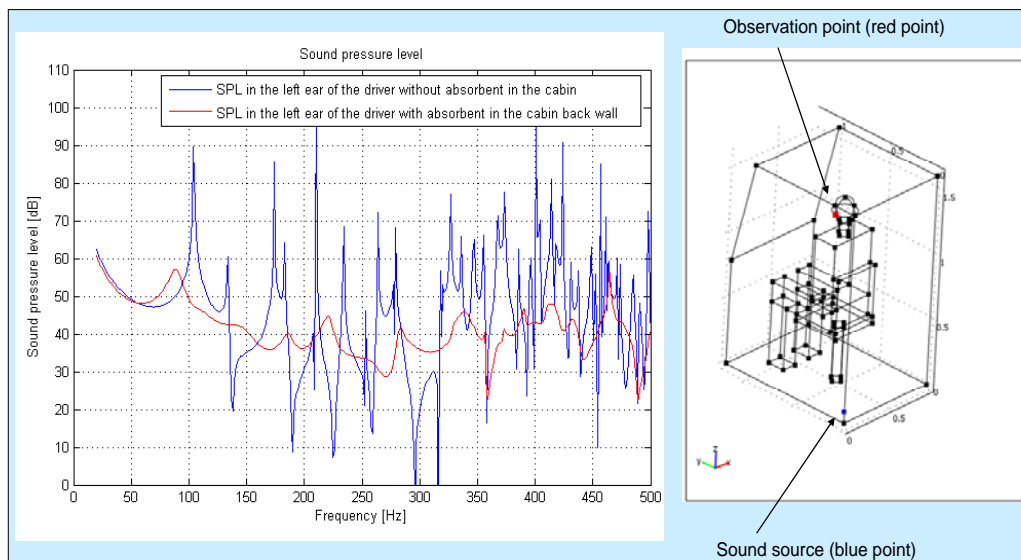


Kuva 6. Äänenpainetasojakauma kuljettajan vertikaalisymmetriatasolla 104 Hz:llä.

Kuvissa 7 ja 8 on esitetty äänenpainetaso taajuuden funktiona kuljettajan vasemman korvan kohdalla ilman absorbenttia ja sen kanssa absorbentti eri sijoitusvaihtoehdoilla. Suurimmat vaikutukset äänenpainejakaumissa ja – tasoissa tapahtuvat 100 – 400 Hz taajuusvälillä, johtuen absorbentti ominaisuuksista.



Kuva 7. Äänenpainetaso kuljettajan vasemman korvan kohdalla ilman absorbenttia ja sen kanssa. Absorbentti on kiinnitetty ohjaamon kattoon.



Kuva 8. Äänenpainetaso kuljettajan vasemman korvan kohdalla ilman absorbenttia ja sen kanssa. Absorbentti on kiinnitetty ohjaamon takaseinään.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuljettajan havaitsema äänenpaine ohjaamossa ja absorbentin sekä sen sijainnin vaikutus voidaan simuloida numeerisesti kytkemällä eri laskentaohjelmia toisiinsa. Tämä mahdollistaa absorbenttirakenteiden sekä niiden sijainnin optimoinnin kuljettavan aistiman äänenvoimakkuuden kannalta. Mitoituskriteerinä voi olla äänenpainetaso tai tähän verrannollinen psykoakustinen suure. Absorbentti voi olla myös aktiivinen tai funktionaalisista materiaalin ominaisuuksia hyödyntävä elementti.

FEM mallien impedanssireunaehdot, tämän suureen laskevia ohjelmia ja ohjelmallisesti suoritettua kytkentää mallien välillä on mahdollista käyttää yleisemminkin erilaisten akustisten tilojen äänikentän laskentaan numeerisesti. Tämä tuo uusia mahdollisuuksia tilojen äänikentän laskentatarkkuuteen, koska useimmiten absorbenttia ja tilaa ei voida mallintaa tarkasti samanaikaisesti rakenteiden monimutkaisuuden ja tästä helposti johtuvan numeerisen laskentakuorman johdosta. Koska analyttinen absorption laskentaohjelma mahdollistaa myös tulokulma-riippuvuuden ominaisimpedanssin laskennassa vaiheriippuvuuksineen, impedanssireunaehdot voidaan hyödyntää tehokkaasti elementtimallilaskennassa.

Myös ohjaamon pintojen kimmo-ominaisuudet voidaan huomioida mallissa, kuten myös rakenteisiin kohdistuvat herätteet, jotka on jätetty tarkoituksenmukaisuuden vuoksi pois esimerkkilaskennassa.

VIITTEET

1. DOWELL E H, GORMAN G F, SMITH D A, Acoustoelasticity: General theory, acoustic natural modes and forced response to sinusoidal excitation, including comparisons with experiment. *J. Sound and Vib.* 52(1977)4, pp. 519–524
2. SAARINEN A, UOSUKAINEN S, NYKÄNEN H, ANTILA M, LINDROOS T, UOTILA T, SIPONEN D & LANKILA A, Kehittyvät absorptiomateriaalit. VTT-R-11314-08, 104 s.
3. COMSOL AB. 2008. COMSOL MULTIPHYSICS. Revision 3.5a.
4. UOSUKAINEN S, SAARINEN A, Kerrosrakenteisten absorbenttien absorptiosuhteen laskentamenetelmä. *Akustiikkapäivät 2009*, 14.–15.5.2009, Vaasa.
5. DELANY M E & BAZLEY E N, Acoustical characteristics of fibrous absorbent materials. *Appl Ac* 3(1970), 105–116
6. BIOT M A, Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28(1956)2, pp. 168-178.
7. BIOT M A, Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28(1956)2, pp. 179-191.