

ÄÄNTÄ ABSORBOIVIEN ELEMENTTIEN MITOITUS PARAMETRISOIDULLA MALLILLA MULTISKAALAMENETELMIÄ KÄYTTÄEN

Seppo Uosukainen

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Rakennedynamiikka ja vibroakustiikka
PL 1000
02044 VTT
Seppo.Uosukainen@vtt.fi

Tiivistelmä

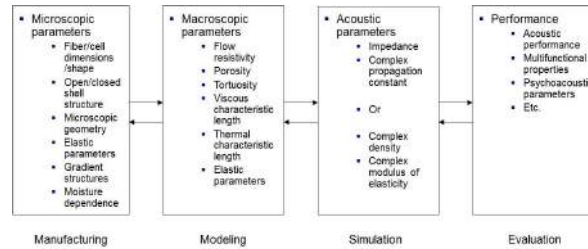
Multiskaalamenetelmien perusteet ja soveltamisen vuokaavio esitetään. Menetelmillä voidaan optimoida rakenteiden absorptio-ominaisuuksia mallipohjaisesti. Erityisesti esitetään yksinkertainen menetelmä hierarkkisen parametrisoidun mallin luomiseksi. Toistaiseksi hierarkkinen mallikirjasto sisältää vain kartioon ja hyperbelipintaan pohjautuvia elementtejä. Absorboivien elementtien suorituskykyä voidaan parantaa mallilla muutamia geometrisia parametreja varioimalla hierarkian ylimmällä tasolla. Muutama esimerkkirakenne, niiden Comsol Multiphysics -ohjelmistolla lasketut makroskooppiset parametrit ja edelleen niistä MATLABilla lasketut absorptiokertoimet esitetään.

1 JOHDANTO

Ääntä absorboivien elementtien suorituskyvyn arviointi perustuu makroskooppisiin parametreihin, esimerkiksi permeabiliteettifunktioihin (mm. ominaisvirtausvastukseen), huokoisuuteen, tortuositeettisuureisiin ja karakteristisiin pituuksiin. Makroskooppiset parametrit eivät ole toisistaan riippumattomia vaan jonkin suureen muuttaminen vaikuttaa muihinkin. Mikroskooppiset parametrit, esimerkiksi kuitujen tai solujen dimensiot ja muodot, ovat enemmän toisistaan riippumattomia, joten niiden variointi haluttujen akustisten ominaisuuksien saavuttamiseksi valituilla taajuuskaistoilla on helpompaa ja tuottaa paremmin materiaalien valmistukseen liittyvää dataa. Multiskaalamenetelmillä mikroskooppisten ja makroskooppisten parametrien väliset riippuvuudet saadaan hallittua. Ääntä absorboivien materiaalien suorituskyvyn hallintaan liittyvä parametriketju on esitetty kuvassa 1.

Yksinkertaisin absorboivien materiaalien malli on Delany-Bazleyn malli, jossa makroskooppisista materiaali-parametreista tarvitaan vain staattinen viskoottinen makroskaalapermeabiliteetti K_0 tai ominaisvirtausvastus σ . Traditionaalisessa jäykkärunkomallissa JCA (Johnson–Champoux–Allard) tarvitaan lisäksi materiaalin huokoisuus ϕ , tortuositeetti α_∞ sekä viskoottinen ja terminen karakteristinen pituus Λ ja Λ' . Uudemmissa jäykkärunkomalleissa JCAL (Johnson–Champoux–Allard–Lafarge) ja JCAPL (Johnson–Champoux–Allard–Pride–Lafarge) tarvitaan lisäksi staattinen terminen makroskaalapermeabili-

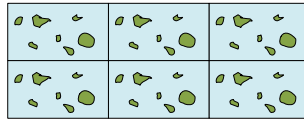
teetti K_0 sekä jälkimmäisessä pientaajuinen (relaksoitu) viskoottinen ja terminen tortuoositeetti α_0 ja α_0' [1]. Taipuisarunkomallien ja Biotin mallin parametreja ei käsitellä tässä. Multiskaalamenetelmien soveltamista Biotin mallissa on käsitelty viitteessä [2].



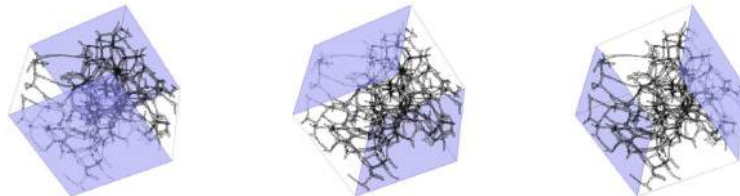
Kuva 1. Ääntä absorboivien materiaalien suorituskyvyn hallintaan liittyvä parametriketju.

2 MULTISKAALAMENETELMÄT

Multiskaalamenetelmissä väliaine oletetaan periodiseksi kuvan 2 mukaisesti. Makroskooppisten parametrien laskenta tapahtuu yhden spatiaalisen periodin eli solun sisällä solun mikroskooppisten ominaisuuksien nojalla. Solun reunoilla periodisten reunaehtojen toteutua kuvan 3 mukaisesti.

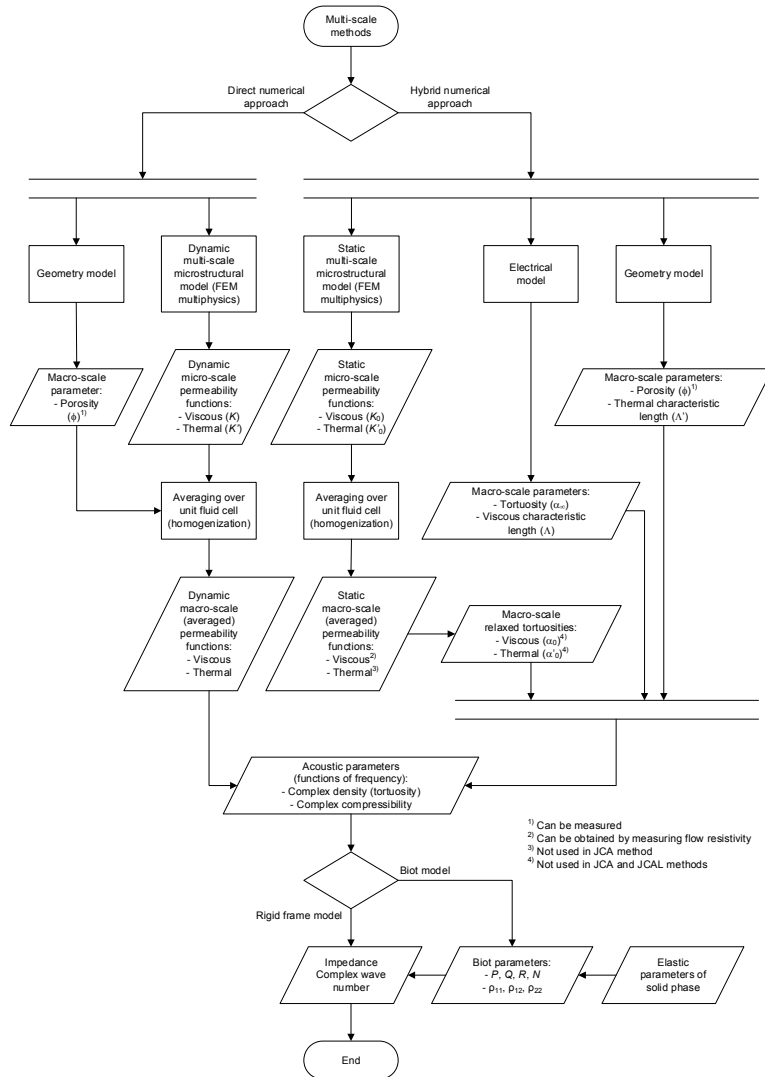


Kuva 2. Periodinen rakenne.



Kuva 3. Periodiset reunaehdot solun vastinpinoilla.

Multiskaalamenetelmillä lasketaan kompleksinen tiheys ja puristuvuus, joista edelleen lasketaan kompleksinen impedanssi ja aaltoluku. Jälkimmäisten avulla absorptiomateriaalin absorptiokerroin on laskettavissa, kun sen paksuus ja sijoittelu ovat tiedossa. Kuvassa 4 on esitetty multiskaalamenetelmien vuokaavio. Kaikkien tarvittavien kaavojen johdot on esitetty viitteessä [2], myös yleisen anisotrooppisen väliaineen ollessa kyseessä. Seuraavassa esitetään suora ja hybridi numeerinen lähestymistapa kompleksisen tiheyden ja puristuvuuden laskemiseksi. Jatkossa tässä esitelmässä käytetään vain hybridimenetelmää sen huomattavasti kevyemmän rakenteensa takia.



Kuva 4. Multiskaalamenetelmien vuokaavio [2].

2.1 Suora numeerinen lähestymistapa

Suorassa lähestymistavassa dynaaminen viskoottinen ja terminen permeabiliteettifunktio \vec{K} (yleisessä tapauksessa dyadi) ja K' (skalaari) lasketaan solun sisällä paikan funktioina yhtälöistä [3, 2]

$$\begin{aligned} \frac{j\omega\rho_0}{\mu} \vec{\mathbf{K}} - \nabla^2 \vec{\mathbf{K}} + \nabla \Pi &= \vec{\mathbf{I}}, \quad \nabla \cdot \vec{\mathbf{K}} = 0 \\ \frac{j\omega\rho_0 c_P}{\kappa} K' - \nabla^2 K' &= 1 \\ \vec{\mathbf{K}} = 0, \quad K' = 0 &\text{ solun sisäisillä reunoilla,} \end{aligned} \quad (1)$$

missä ω on kulmataajuus, ρ_0 , μ , κ ja c_P ovat fluidin tiheys, viskositeettikerroin, lämmönjohtavuus ja ominaislämpö vakiopaineessa, $\vec{\mathbf{I}}$ on identtinen dyadi ja Π on äänenpaineeseen sidoksissa oleva vektoriooperaattori.

Kun permeabiliteettifunktiot homogenisoidaan eli keskiarvostetaan yli solun, saadaan dynaaminen viskoottinen ja terminen makroskaalapermeabiliteetti, joista voidaan suoraan laskea kompleksinen tiheys ja puristuvuus [3, 4, 5, 6, 2].

2.2 Hybridi numeerinen lähestymistapa

Hybridilähestymistavassa staattinen viskoottinen ja terminen permeabiliteettifunktio lasketaan solun sisällä paikan funktioina yhtälöistä

$$\begin{aligned} -\nabla^2 \vec{\mathbf{K}} + \nabla \Pi &= \vec{\mathbf{I}}, \quad \nabla \cdot \vec{\mathbf{K}} = 0 \\ -\nabla^2 K' &= 1 \\ \vec{\mathbf{K}} = 0, \quad K' = 0 &\text{ solun sisäisillä reunoilla.} \end{aligned} \quad (2)$$

Kun permeabiliteettifunktiot homogenisoidaan, saadaan staattinen viskoottinen ja terminen makroskaalapermeabiliteetti [4, 7, 8, 2] ja näistä voidaan edelleen laskea pientaajuinen viskoottinen ja terminen tortuositeetti [1, 5, 7, 2]. Solun geometriasta on laskettavissa huokoisuus ja terminen karakteristinen pituus [9, 2]. Staattisen hiukkasnopeuden (tai sähkökentän) jakaumasta solun sisällä häviöttömässä tilanteessa saadaan sopivasti homogenisoidulla tortuositeetti ja viskoottinen karakteristinen pituus [7, 8, 10, 2]. Kaikista näistä parametreista on lopuksi laskettavissa kompleksinen tiheys ja puristuvuus [7, 1, 9, 11, 12, 13, 2].

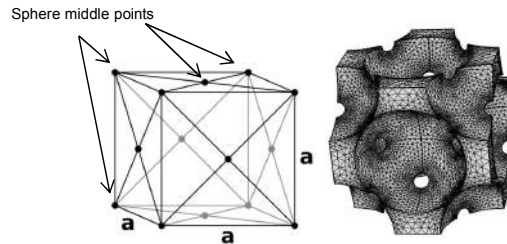
2.3 Simulointilogiikan ohjelmointi

Eri parametrien laskenta on toteutettu Comsol Multiphysics ja MATLAB -ympäristöissä. Dynaaminen ja staattinen viskoottinen permeabiliteettifunktio ja niiden homogenisoinnit lasketaan Comsolin ”Laminar Flow” -fysiikalla, dynaaminen ja staattinen terminen permeabiliteettifunktio ja niiden homogenisoinnit Comsolin ”Heat Transfer in Fluids” -fysiikalla sekä staattisen hiukkasnopeuden jakauma ja siihen tehtävät homogenisoinnit Comsolin ”Electrostatics” -fysiikalla. Näistä suoraan saatavat johdossuuret lasketaan edelleen Comsolilla. Kompleksinen tiheys ja puristuvuus sekä niistä saatavat kompleksinen impedanssi ja aaltoluku lasketaan MATLAB-ohjelmistoilla. Lopuksi absorptiomateriaalin absorptiokerroin lasketaan impedanssista ja aaltoluvusta MATLAB-ohjelmistolla [14].

2.4 Validointilaskennat

Simulointilogiikan toimivuus on testattu monilla eri keinoin, joista tässä esitetään vain yksi. Kuvan 5 mukaisen palloista konstruoidun FCC-geometrian (Face-Centered Cubic)

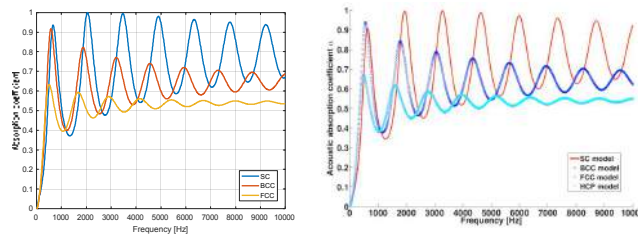
hybridimenetelmän mukaiset makroskooppiset parametrit on laskettu ja ne esitetään taulukossa 1 kahden kirjallisuudessa löytyvien laskentatulosten kanssa [5]. Kuvassa 6 on esitetty saatu absorptiokerroin yhdessä Leen tulosten kanssa. Havaitaan, että vastaavuus on hyvä.



Kuva 5. FCC-geometria.

Taulukko 1. FCC-geometrian makroskooppiset parametrit.

Structure	Face-Centered Cubic (FCC)		
Parameter	Lee et al.	Gasser et al.	This study
ϕ	0,26	0,26	0,260
K_0 [m ²]	6.70E-10	6.83E-10	6.84E-10
α_0	2,49	2,63	2,62
α_w	1,65	1,66	1,650
Λ [m]	1.59E-04	1.64E-04	1.60E-04
K_0' [m ²]	2.70E-09	2.74E-09	2.72E-09
α_0'	1,85	1,85	1,853
Λ' [m]	2.47E-04	2.49E-04	2.48E-04



Kuva 6. Validointilaskennan absorptiokerroin, vasen: tämä tutkimus, oikea: Lee *et al.* [5]. Kuvat sisältävät myös muita geometrioita. Absorboiva rakenne on 100 mm paksu ja kiinni jäykässä seinässä. Tulokulma on normaali.

3 GEOMETRIAN PARAMETRISOINTI

Parametrinen kirjasto on toteutettu hierarkkisesti Comsolissa. Lähtökohtana on yksinkertaiset alkeiselementit, joita toistaiseksi on olemassa vain kartiomaisia ja hyperbolisia. Alkeiselementeistä voidaan muodostaa korkeamman asteen elementtejä ja varsinaiset rakenteet toteutetaan näistä ja alkeiselementeistä. Kaikkia osia voidaan modifioida muuttamalla vain muutamia parametreja. Parametrimuutokset tehdään hierarkian ylimmällä tasolla.

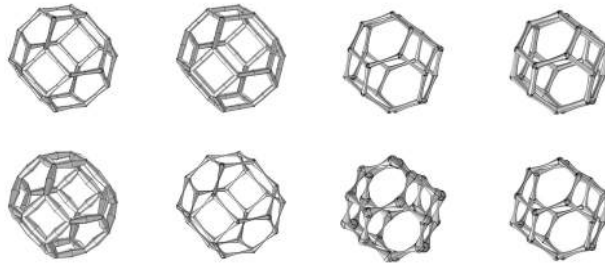
Kuvassa 7 on esitetty alkeiselementtejä muutamilla parametrivalinnoilla, kuvassa 8 korkeamman asteen elementtejä ja kuvassa 9 varsinaisia rakenteita.



Kuva 7. Alkeiselementtejä, vasemmalla kartiotyypisiä, oikealla hyperbolisia.



Kuva 8. Korkeamman asteen elementtejä, vasemmalla kartioelementtipohjaisia, oikealla hyperbelielementtipohjaisia.

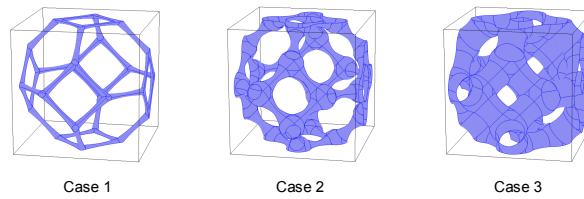


Kuva 9. Varsinaisia rakenteita, vasemmalla kartioelementtipohjaisia, oikealla hyperbelielementtipohjaisia.

4 ESIMERKKILASKENTA

Esimerkkilaskentana esitetään pyörähdyssymmetrisiin hyperbolisiin elementteihin perustuva rakenne, jossa solukoko on $100 \mu\text{m} \cdot 100 \mu\text{m} \cdot 100 \mu\text{m}$ ja jossa hyperbelin maksimi- ja minimihalkaisijat ovat $6 \mu\text{m}$ ja $3.6 \mu\text{m}$ (Case 1), $20 \mu\text{m}$ ja $6 \mu\text{m}$ (Case 2) sekä $30 \mu\text{m}$ ja

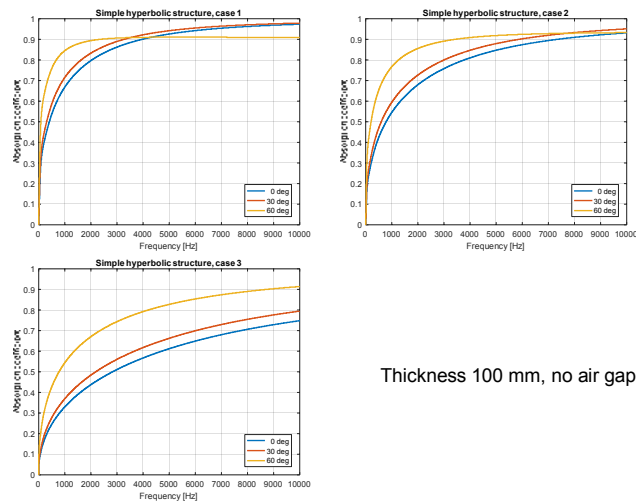
21 μm (Case 3). Kuvassa 10 on esitetty rakenteiden solut. Taulukossa 2 on esitetty esimerkkirakenteen vaihtoehtojen lasketut makroskooppiset parametrit. Kuvassa 11 on esitetty lasketut absorptiokertoimet kolmella eri tulokulmalla. Nähdään, että kahdella parametrimuutoksella on aikaansaataavissa mittavia muutoksia rakenteeseen ja saataisiin absorptiokertoimiin.



Kuva 10. Esimerkkirakenteen solun vaihtoehdot.

Taulukko 2. Esimerkkirakenteen vaihtoehtojen makroskooppiset parametrit.

Parameter		Case 1	Case 2	Case 3
Porosity	ϕ	0.989	0.930	0.746
Relaxed viscous tortuosity	α_0	1.19	1.36	1.80
Relaxed thermal tortuosity	α_0'	1.11	1.19	1.31
Tortuosity	α_∞	1.01	1.05	1.22
Static viscous permeability	K_0 [m^2]	2.45E-10	1.35E-10	4.35E-11
Static thermal permeability	K_0' [m^2]	4.64E-10	2.71E-10	1.18E-10
Viscous characteristic length	Λ [m]	1.12E-04	5.05E-05	2.46E-05
Thermal characteristic length	Λ' [m]	1.92E-04	8.50E-05	4.13E-05



Kuva 11. Esimerkkirakenteen vaihtoehtojen absorptiokertoimet kolmella eri tulokulmalla.

KIITOKSET

Työn teoria- ja validointiosa on tehty yhteisrahoitteisessa FIMECC SHOKin HYBRIDS-hankkeessa (Hybrid Materials), jonka rahoittajina oli TEKES, VTT ja teollisuus. Parametrisio on tehty VTT:n rahoittamassa For Industry – Digital Engineering 2016 -hankkeessa.

VIITTEET

- [1] 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.
- [2] Uosukainen S, Multi-scale computation of sound absorbing materials, Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Research Report VTT-R-05212-16, 2016.
- [3] Lafarge D, Lemarinier P, Allard J F, & Tarnow V, Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies, *J. Acoust. Soc. Am.* 102(1997)4, 1995–2006.
- [4] Perrot C, Chevillotte F, Panneton R, Dynamic viscous permeability of an open-cell aluminium foam: Computation versus experiments, *J. Appl. Phys.* 103(2008), 024909.
- [5] Lee C-Y, Leamy M J, Acoustic absorption calculation in irreducible porous media: A unified computational approach, *J. Acoust. Soc. Am.* 126(2009)4, 1862–1870.
- [6] Peyrega C, Jeulin D, Estimation of acoustic properties and of the representative volume element of random fibrous media, *J. Appl. Phys.* 113(2013)10491.
- [7] Lafarge D, The equivalent fluid model, In: Bruneau M, Potel C (editors), *Materials and Acoustic Handbook*, London: ISTE Ltd, 2009.
- [8] Perrot C, Chevillotte F, Panneton R, Bottom-up approach for microstructure optimization of sound absorbing materials, *J. Acoust. Soc. Am.* 124(2008)2, 940–948.
- [9] Allard J F, Atalla N, *Propagation of Sound in Porous Media*, Chichester: John Wiley & Sons, 2009.
- [10] Johnson D L, Koplik J, Dashen R, Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, *J. Fluid Mech.* 176(1987), 379–402.
- [11] Pride S R, Morgan F D, Gangi A F, Drag forces of porous medium acoustics, *Phys. Rev. B* 47(1993), 4964–4978.
- [12] Lafarge D, Propagation du son dans les matériaux poreux à structure rigide saturés par un fluide viscothermique, Ph D thesis, Université du Maine, 1993.
- [13] Duval A, Hoang M T, Marcel V, Perrot C, Development of acoustically effective foams: a new micro-macro optimization method, VDI Pur Tagung 2012.
- [14] Uosukainen S, Saarinen A, Kerrosrakenteisten absorptiosuhteen laskentamenetelmä, *Akustiikkapäivät 2009*, Vaasa, 222–227.