

KAIUTTOMIEN HUONEIDEN KIILARAKENNE

Juha Backman¹, Timo Peltonen², Henrik Möller²

¹Nokia Mobile Phones
PL 100, 00045 NOKIA GROUP
juha.backman@nokia.com

²Akukon Oy
Kornetintie 4, 00380 HELSINKI
timo.peltonen@akukon.fi; henrik.moller@akukon.fi

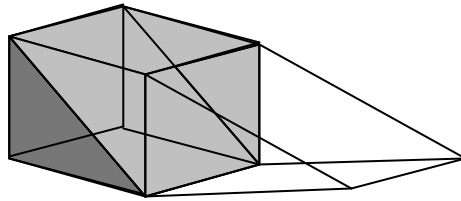
1 JOHDANTO

Kaiuttomien huoneiden absorptiorakenne on perinteisesti ollut homogeenisesta materiaalista valmistettu kiila, joka usein on kiinnitetty suoraan jäykkään alustaan. Tämän rakenteen mitoituksessa on kuitenkin tehtävä materiaalivalinnoissa kompromisseja keskialueen ja pienten taajuuksien absorption välillä, ja yksinkertaisella rakenteella on mahdotonta saavuttaa täydellistä sovitusta ilman ja absorptiorakenteen välillä. Tarkastelemme tässä uutta kiilarakennetta, joka mahdollista tehokkaamman absorption laajemmalla taajuuskaistalla, ja tarkastelemme myös kriteereitä ja menetelmiä absorption optimoimiseksi.

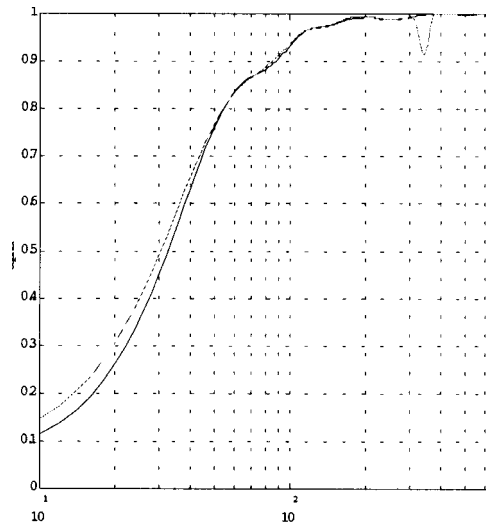
2 UUSI KIILARAKENNE

Kaiuttomien huoneiden suunnittelijalla on koko joukko haasteita: alarajataajuuden tulisi olla mahdollisimman alhainen, eräissä sovellutuksissa (materiaalimittaukset, impulssivaste-mittaukset sähköakustiikassa jne.) heijastuskertoimen tulisi olla hyvin pieni darajan yläpuolella, kaiuttomaan huoneeseen tulisi jäädä hieman sisätilaa kiilojen asennuksen jälkeen (esimerkiksi TKK:n suuren kaiuttoman huoneen tilavuudesta noin puolet on absorptiomateriaalia) ja kustannusten tulisi pysyä kohtuullisina. Lisäksi suunnittelulla on puhtaasti teoreettisia rajoituksia: Ingard [1] on osoittanut, ettei homogeenisellä huokoisella absorbentilla, materiaaliparametreista riippumatta, voida saavuttaa täyttä tasoaallon absorptiota pienillä taajuuksilla.

Kuten hyvin tunnettua, kaiuttoman huoneen toteutukseen luontevin valinta on ominaisuuksiltaan hitaasti muuttuva rakenne. Näistä yleisin on kiilarakenne, ja Lampio [2] osoitti, että helposti realisoituvista rakenteista parhaaseen kompromissiin absorption tasaisuuden ja alarajataajuuden välillä päästään yhdessä suunnassa kapenevalla sivusta katsoen kolmiomaisella kiilalle. Aiemmat toteutukset ovat osoittaneet, että käyttämällä kantaosassa kerroksittain tihenevää rakennetta pienten taajuuksien absorptiota voidaan parantaa, mutta sopivien materiaalien löytäminen useisiin eri kerroksiin on vaikeaa. Jos kuitenkin jatkuvasti muuttuvan impedanssin periaatetta sovelletaan myös kantaosaan (kuva 1), voidaan materiaalit valita siten, että heijastusominaisuudet sekä alarajataajuuden tuntumassa että suuremmilla taajuuksilla voidaan optimoida. Ensimmäiset tämän tyyppisestä kiilasta tehdyt mittaukset (kuva 2) osoittavat, että rakenteella saavutetaan kohtuullisen alhainen alarajataajuus ja tasaisesti käyttäytyvä absorptio.



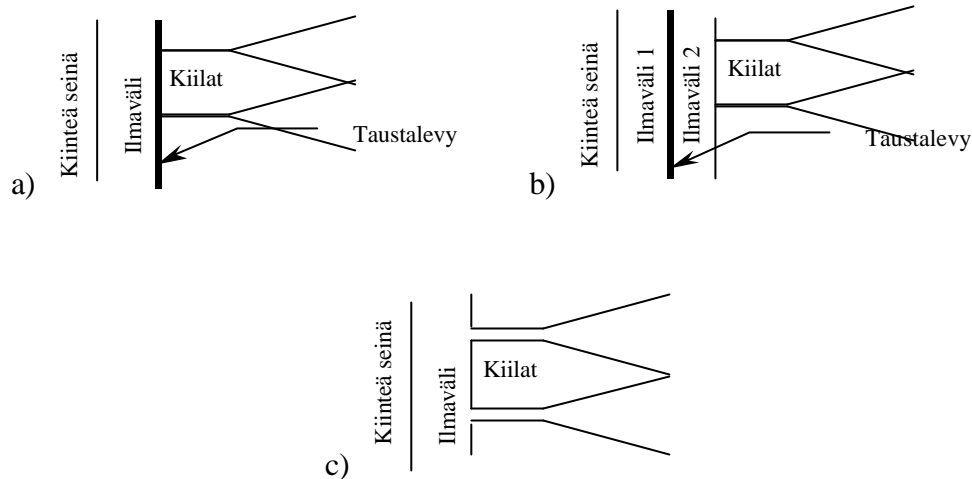
Kuva 1. Uuden kiilarakenteen periaate.



Kuva 2. Kiilaprototyypille (80 cm kokonaispituus, 20 cm kanta) seisovan aallon putkessa mitattu absorptiokerroin.

3 RESONAATTORIRAKENTEET

Tunnettu menetelmä absorptiorakenteen taajuuskaistan laajentamiseen pienille taajuuksille on käyttää absorpentin yhteydessä resonaattoria. Resonaattorin käytöllä on useita mahdollisia tavoitteita: tilan reunaehtojen muokkaaminen alimman ominaistaajuuden tuntumassa, hiukkasnopeuden absorptiomateriaalissa (ja siten absorboituvan tehon) kasvattaminen tai seuraavassa kappaleessa tarkasteltava impedanssin tarkempi sovittaminen tulevaan aaltoon.



Kuva 3. Resonaattorirakenteen toteutusmahdollisuuksia: a) levyresonaattori, jossa kiilat on asennettuilevyyn, b) erillinen levyresonaattori, jonka molemmin puolin ilmaväli ja c) Helmholtz-resonaattori.

Resonaattorin eri toteutusmahdollisuuksilla on etunsa ja haittansa: suoraan taustalevyyn liimatut kiilat (kuva 3a) ovat helppoja asentaa ja kiilojen massa helpottaa resonaattorin virittämistä riittävän alas kohtuullisella ilmavälillä, mutta resonaattorin häviöt ovat vaikeita arvioida ja kontrolloida, ja suunnitteluparametrit riippuvat toisistaan. Ilmaväli resonaattorin molemmin puolin (kuva 3b) vaikeuttaa mekaanista rakennetta, mutta mahdollistaa riippumattoman mitoituksen, pienemmät resonaattorin häviöt ja lisää hiukkasnopeutta (ja siten energiahäviötä) kiilarakenteessa. Helmholtz-resonaattorirakenne (kuva 3c) edellyttää, että kiilan kantaosa verhoillaan ilmaa läpäisemättömästi, jotta häviöt olisivat edes jossain määrin kohtuullisia. Kiilojen väliin jäävät raot tai reiät voivat lisäksi resonoida korkeammilla taajuuksilla. Siten levyresonaattorirakenteita voitaneen pitää turvallisempina vaihtoehtoina.

Levyresonaattoriin liittyvää kiilarakennetta ei voida mitenkään väittää paikallisesti reagoivaksi, mutta jos käytetään rakennetta, jossa kiilat on asennettu resonaattorilevyyn, taivutusaallon vaimennus on suuri, ja toisaalta kiilojen takana erillään olevassa levyresonaattorissa etenevien taivutusaaltojen säteily ei pääse etenemään kovinkaan tehokkaasti. Kiilojen taakse jäävän tilan jakaminen pienempiin osiin on kuitenkin perusteltua, sillä pintaan tulevaa aaltoa ei mitenkään voida pitää ainakaan koko seinän alalla homogeenisena.

4 ÄÄNIKENTÄN KAAREVUUDEN VAIKUTUS

Don B. Keele [3] osoitti, että pienillä taajuuksilla (kun äänilähde ei enää ole aallonpituuteen nähden kaukana seinästä) absorptiota ei pitäisikään pyrkiä mitoittamaan impedanssiltaan resistiiviseksi ja vastaamaan tasoallon impedanssia, vaan impedanssin pitäisi vastata palloaaltoa (ts. olla jossain määrin induktiivinen ja itseisarvoltaan tasoallon impedanssia suurempi).

Standardien [4] mukaiset verifikaatiomittaukset määrittelevät kaiuttoman huoneen toiminnan poikkeamina $1/r$ -laista, kun taas kiilojen suunnittelussa mittaukset on tehtävä seisovan aallon putkella. Keelen havainnon tärkeä seuraus on se, ettei pelkkä seisovan aallon putkessa mitattu heijastuskertoimen itseisarvo anna aivan oikeaa kuvaa absorbenttien käyttäytymisestä kaiuttomassa huoneessa. Jos rakenteelle sen sijaan määritellään mittauksilla kompleksinen kohtisuora impedanssi,

on myös palloaallon heijastuskertoimen määrittely mahdollista. Tarkemman kuvan saamiseksi olisi tilassa tarkasteltava sekä tasoallon että palloaallon heijastumista, sillä palloaallon heijastuminen määrittelee ensimmäisen heijastuksen ominaisuudet ja tasoallon heijastuminen taas tilan ominaismuotojen vaimennuksen.

Äänikentän kaarevuuden impedanssisovitukselle aiheuttamat vaatimukset tekevät resonaattoreiden tarjoamat mahdollisuudet huomattavasti mielenkiintoisemmiksi. Pelkään huokoiseen absorbenttiin perustuvissa rakenteissa pienten taajuuksien induktiivinen ja resistiivinen komponentti ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa, mutta resonaattorirakenne mahdollistaa tarkemman suunnittelun: impedanssin resistiivistä komponenttia voidaan kontrolloida absorbentilla ja reaktiivista resonaattorilla. Resonanssin alapuolella resonaattori kuitenkin heikentää palloaallon sovitusta, sillä impedanssin vaihekulma kääntyy samalla kun itseisarvo kääntyy laskuun.

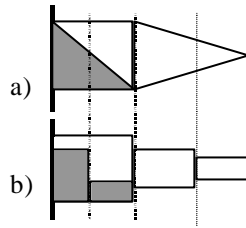
5 LASKENNALLINEN MALLINTAMINEN

Kiilarakenteen laskennallisen mallintamisen haasteena on löytää oikea kompromissi laskennallisen monimutkaisuuden ja mallin tarkkuuden välillä. Yleistikin huokoisten materiaalien mallintaminen on vaikeaa ja materiaaliparametrit (huokoisuus, virtausreitit todellista pituutta kuvaava rakennevakio, huokoskoko jne.) ovat usein vaikeita määrittellä yksinkertaisilla ulkoisilla mittauksilla, ja ovat valmistusprosessin takia luonteeltaan tilastollisia.

Huokoisten, jäykkien, absorbenttien etenemiskertoimen ja ominaisimpedanssin mallintamisessa usein sovellettu malli on puolittain kokeellinen Delany-Bazley malli [5], jonka kertoimiin Miki [6] on esittänyt tarkennuksia. Parametrinä tarvittava virtausvastus voidaan määrittellä Sidesin et al. [7] esittämästä, myöskin osittain kokeellisesta, lausekkeesta. Malli toimii parhaiten kuituisilla absorbenteilla, ja tarkkuus heikkenee vaahtomuovin tyyppisillä materiaaleilla, etenkin jos osa huokosista on suljettuja. Samaten materiaalin joustavuus heikentää mallinnustarkkuutta.

Kun materiaalien akustiset ominaisuudet on määritelty, voidaan kiilarakenteelle muodostaa approksimaatio porrasmaisena rakenteena (kuva 4), jossa kussakin kerroksessa impedanssi ja etenemiskerroin ovat pinta-aloilla painotettuja materiaalien keskiarvoja. Lampion mukaan kärkiosalle riittää jakaminen noin 20 kerrokseen, ja voimme käyttää samaa arviota myös kahdesta materiaalista koostuvalle kantaosalle. Tällöin jätetään kuitenkin huomiotta äänikentän kaareutuminen, joka johtuu äänen erilaisista nopeuksissa vapaassa tilassa ja absorptiomateriaalissa tai eri absorptiomateriaaleissa. Kuten kanavavaimennuksen mitoituksesta tunnetaan, tällainen kentän kaareutuminen kasvattaa korkeitten äänten absorptiota tasoaltoapproksimaatiolla lasketusta.

Kun keskimääräiset materiaaliparametrit on laskettu, etupinnassa näkyvä impedanssi määritellään siirtolinjateorian mukaista sijaiskytkentää (tai sitä vastaavaa T-matriisiesitystä) lähtien takapinnasta (joka voidaan yleensä olettaa jäykäksi) ja edeten kerros kerrokselta etupintaan [1] [2]. Mahdollisia resonaattorilevyjä kannattaa yksinkertaisuuden vuoksi mallintaa keskitettyinä massoina (= suorassa analogiassa induktanssi); ilmaväleille luonnollisestikin on sovellettava siirtolinjamallia. Näin määrittelystä impedanssista voidaan määrittellä heijastuskero, jos kiilat (kuten yleensä) voidaan olettaa paikallisesti reagoiviksi; vaikka materiaali ei sinänsä täysin täyttäisi paikallisen reagoinnin edellytyksiä, pinnan jakaminen erillisiksi kiiloiksi estää ei-paikallisen reagoinnin edellyttämän pintaallon etenemisen.



Kuva 4. Jatkuvasti muuttuvan kiilarakenteen mallintaminen porrasmaisena rakenteena.

Vastaavaa mallia voidaan käyttää myös seinän ääneneristävyyden karkeaan arviointiin [8]. Malli jättää huomiotta ulkoseinän taivutusvärähtelyt jne., mutta kiilarakenteen, ja etenkin eristävyyden kannalta kriittisten resonaattorirakenteiden, aiheuttamaa eristävyyden muutosta voidaan arvioida siirtolinjamallilla, jossa laskenta aloitetaan ensin määrittelemällä ulkoseinän ulkopinnassa näkyvä impedanssi ja tästä eteenpäin kunkin kerroksen hiukkasnopeus, kunnes päädytään huoneen vapaaseen sisätilaan.

Mechl [9] on tarkastellut mallinnusongelmaa huomattavasti laajemmin, ja esittänyt mm. malleja, joissa kiilojen väliin jäävää ilmatilaa tarkastellaan vaimennusmateriaalilla verhoiltuna kanavana. Tämä mallintaa etenkin suurempia taajuuksia tarkemmin, mutta haittana on oleellisesti kasvanut laskennallinen monimutkaisuus, mikä haittaa mallien käyttöä optimoinnissa.

6 RAKENTEEN OPTIMOINTI

Olemme edellä tarkastelleet edellä sitä suurta joukkoa tekijöitä, joka on otettava huomioon kiilarakenteen mitoituksessa. Yksinkertainen homogeeninen rakenne on vielä suunniteltavissa kokeellisesti, varsinkin jos materiaalivaihtoehtoja ei ole monia, mutta kaikkien tässä esitettyjen tekijöiden ottaminen huomioon edellyttää numeerista optimointia. Yleensä kaiutonta huonetta spesifioitaessa määritellään käytettävissä oleva tila, tavoitteena oleva vapaa tila ja alarajataajuus (yleensä taajuutena, jonka yläpuolella heijastus on vaimentunut vähintään 20 dB). Vapaa tila määrittelee absorptiorakenteen kokonaissyvyyden, mutta suunnittelijan valittaviksi jäävät vielä materiaaliparametrit, kiilan kärjen osuus kokonaissyvyydestä ja mahdollinen resonaattorirakenne. Vapaiden muuttujien suuren määrän takia pelkkä alarajataajuus ei riitä yksikäsitteiseksi mitoituskriteeriksi. Mahdollisia lisäkriteereitä ovat jokin toinen sopivasti määritelty alarajataajuus (esimerkiksi 50 % absorptio) ja keskimääräinen absorptio alarajataajuuden yläpuolella, joiden yhdistelmänä voidaan määritellä absorptiorakenteelle yhden luvun laatukriteeri. Kriteereiden yhdistelmää määriteltäessä kullekin osatekijälle voidaan määritellä eri alueita (ei hyväksyttävissä/kriittinen/vähemmän tärkeä), joiden välillä painokertoimia voidaan muuttaa.

Kriteerit on määriteltävä siten, että ne määrittelevät matemaattisesti hyväksyttävän normin [10]; käytännössä tärkein rajoitus tästä vaatimuksesta on se, että laskentatuloksia ei saa tarkastella siten, että ero indikoiva luku voisi mennä nolleen myös silloin, kun vertailtavat heijastuskertoimet eivät ole täysin identtisiä.

Näin määriteltyä normia ja rakenteen geometrisia rajoituksia käyttäen voidaan rakenne optimoida; optimointikokeiluissa on käytetty simplex-algoritmiin perustuvaa Matlabin standardifunktiota *fmins*. Tällaisen optimoinnin ongelma on se, että käytännössä materiaaliparametrejä ei voida määritellä jatkuvana funktiona, vaan materiaaleille on käytettävä muutamia, kaupallisesti saatavissa olevia

tuotteita, vastaavia diskreettejä arvoja. Geometrian on siten optimoitava kaikille järkeville materiaaliyhdistelmille erikseen ja tämän jälkeen näistä on valittava käyttökelpoisin.

LÄHTEET

1. INGARD, U, *Notes on Sound Absorption Technology*, Noise Control Foundation, Poughkeepsie, 1994.
2. LAMPIO, EERO, *Gradual-transition wedge-shaped absorption structure*, TKK, Akustiikan laboratorio, Espoo, 1981, julkaisu n:o 25, 22–27.
3. KEELE, D B, Anechoic Chamber Walls: Should They be Resistive or Reactive at Low Frequencies? *Audio Engineering Society 94th Int. Conv.*, preprint no. 3572. Audio Engineering Society, New York, 1993.
4. ISO 3745: 1977 *Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources - Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms*, Annex A. ISO, 1977.
5. DELANY M E, BAZLEY E N, Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials, *Applied Acoustics*, **3**(1970), 105–116.
6. MIKI Y, Acoustical Properties of Porous Materials - Modifications of Delany-Bazley Models. *J. Acoust.Soc. Jpn. (E)*, **11**(1990)1, 19–24.
7. SIDES D J, ATTENBOROUGH K, MULHOLLAND K A, Application of a Generalized Acoustic Propagation Theory to Fibrous Absorbents. *Journal of Sound and Vibration*, **19**(1971)1, 49–64.
8. KOSTEN C W, Theory of Sound Transmission, teoksessa RICHARDSON E G (toim.), *Technical Aspects of Sound*, vol. I, Elsevier, Amsterdam, 1953, 113-119.
9. MECHEL F P, *Schallabsorber, Band III: Anwendungen*, S. Hirzel Verlag Stuttgart/Leipzig, 1998, 47–121.
10. RUDIN W, *Real and Complex Analysis*. McGraw-Hill Book Co., New York, 1987, s. 8.