

ABSORPTIOMATERIAALIN VAIKUTUS PITKIEN KÄYTÄVIEN A-ÄÄNITASOON

Akustiseen peilikuvateoriaan perustuva äänikentän eksplisiittinen laskentamenetelmä

Juhani Kuronen

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
PL 20 53851 LAPPEENRANTA
juhani.kuronen@lut.fi

1 JOHDANTO

Käytävän kovien pintojen verhoileminen absorptiomateriaalilla on tehokas ja myös taloudellisesti kilpailukykyinen ratkaisu käytävämeluongelmiin. Akustinen verhoilu vähentää käytävän äänitasoa ja lyhentää kaiuntaa. Toimenpide pienentää myös usein käytävän varrella sijaitsevien huoneiden lisäakustoinnin tarvetta. Ehdotettujen meluntorjuntatoimenpiteiden tehokas mallintaminen on tänä päivänä avainkysymys akustisessa suunnittelussa. Käytävään asennetun akustisten vaimennusmateriaalin vaikutuksen tarkka ennustaminen käytävän äänikenttään on tärkeää, koska verhousmateriaali ja asennuskustannukset ovat korkeat [1]. Etenkin korjausrakentamisessa ja jo valmiissa rakennuksessa jälkikäteen tehdyt muutokset ovat työläitä ja kalliita. Tämän vuoksi myös käytävän verhoiluun käytetyn akustinen materiaalin kustannus-hyötysuhde tulee optimoida.

Markkinoilla olevat akustiset mallinnusohjelmat ovat tehokkaita, mutta liian järeitä pieniin, lyhytkestoisiin rakennusprojekteihin [2]. Tässä tutkimuksessa esitellään akustisen kuvateorian laskenta-algoritmiin perustuva eksplisiittinen laskentamenetelmä, jolla voidaan nopeasti arvioida akustisen vaimennusmateriaalin vaikutus pitkien käytävien äänikenttiin.

2 MATERIAALI JA MENETELMÄT

Akustisessa kuvateoriassa luodaan todellisen äänilähteen kuva-avaruus, joka sisältää äärettömän määrä kuvalähteitä. Poikkileikkaukseltaan neliön muotoisissa käytävissä, joissa päätyseinät eivät heijasta ääntä, kuva-avaruus kutistuu todellisen äänilähteen sisältäväksi kuvasoksi [3,4]. Tässä tutkimuksessa äärettömän kuvatason diskreettien kuvalähteiden äänitehot korvataan äänitehon jatkuvalla jakautumalla. Käytävällä olevan vastaanottopisteen kokonaisuutena saadaan integroimalla jatkuvan äänitehojakautuman pienen äänitehoalkion vastaanottopisteeseen synnyttämä äänen intensiteetti koko jakautuman yli. Vastaanottopisteeseen etenevää äänen intensiteettiä pienentävät etäisyysvaimennus sekä pintojen absorptio. Pitkissä käytävissä myös ilman vaimennuksella on merkitystä, etenkin korkeilla taajuuksilla.

2.1 Kuvälähteiden ääniteho ja yhdistäminen

Tarkastellaan neliön ($H \times H$) muotoista käytävää, jonka poikkileikkauksen keskipisteeseen on sijoitettu todellinen äänilähde. Kun käytävän päätyseinät eivät heijasta ääntä, syntyy todellisen äänilähteen ympärille ääretön kuvataso. Yhdistetään ääniteholtaan yhtä voimakkaat kuvälähteet toisiinsa suorilla. Tällöin muodostuu todellisen äänilähteen ympärille saman keskeisiä neliöitä. Näiden samankeskisten neliöiden kehien äänitehojen summat muodostavat sarjan: $4W\beta + 8W\beta^2 + 12W\beta^3 + 16W\beta^4 + \dots + 4nW\beta^n$, jonka kokonaissumma S on:

$$S = \frac{4W\beta}{(1-\beta)^2} \quad (1)$$

Jokaisen neliön kehällä on $4n$ kappaletta kuvälähteitä, joista aina neljä sijaitsee neliön kulmissa, etäisyydellä nH todellisesta äänilähteestä. Kuvälähteistä $4(n-1)$ kappaletta sijaitsee kyseisen neliön sivuilla. Tehdään yksinkertaistus. Siirretään kunkin neliön kehällä olevat $4n$ kuvälähdettä samaan pisteeseen positiiviselle x - akselille, joka on etäisyydellä nH todellisesta äänilähteestä. Muutetaan näin syntynyt kuvälähteiden diskreetti äänitehosumma origosta lähteväksi jatkuvaksi jakaumaksi [5,6]. Kuvataan äänitehon jakautumaa eksponenttikäyrällä:

$$y = B \times X\beta^{\frac{x}{H}} \quad (2)$$

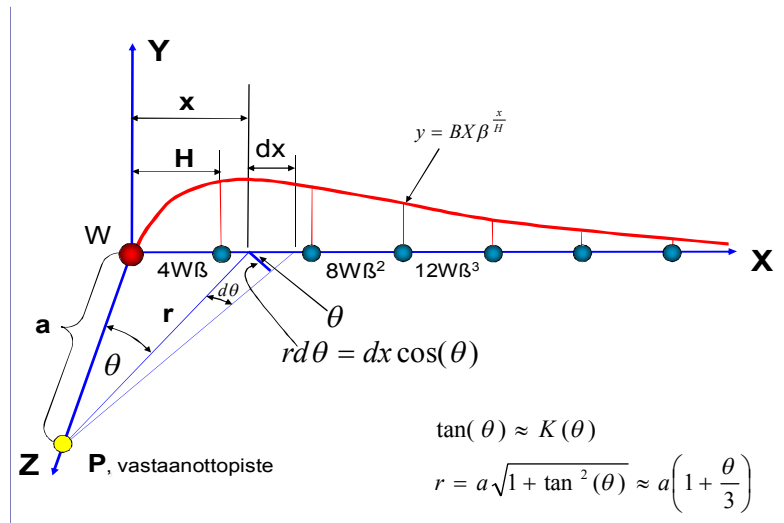
jossa B on todellisen äänilähteen äänitehosta ja pintojen heijastuskertoimesta β riippuva kerroin, H on käytävän korkeus ja leveys sekä x on etäisyys origoon sijoitetusta todellisesta äänilähteestä pitkin kuvälähdeakselia, kuva 1. Kertoimen B määrittelemiseksi tehokäyrä integroidaan arvosta $x = 0$ arvoon $x = \infty$. Tehokäyrän ja positiivisen x - akselin väliin jäävän pinta-alan on oltava yhtä suuri, kuin kuvälähteiden äänitehosumman S . Tehokäyrä on nyt muotoa:

$$y = \frac{4W\beta(\ln \beta)^2}{H^2(1-\beta)^2} \times X\beta^{\frac{x}{H}} \quad (3)$$

2.2 Äänen intensiteetti vastaanottopisteessä

Lasketaan jatkuvan äänitehojakautuman synnyttämä äänen kokonaisintensiteetti vastaanottopisteessä P , joka on z -akselilla etäisyydellä a todellisesta äänilähteestä. Otetaan huomioon myös vaimennustekijä e^{-mr} , jossa m on ilman vaimennus. Tehokäyrän pieni dx - alkio, joka on r etäisyydellä vastaanottopisteestä, synnyttää vastaanottopisteessä intensiteetin I_{dx} :

$$I_{dx} = \frac{B \times X\beta^{\frac{x}{H}} \times e^{-mr} dx}{4\pi \times r^2} \quad (4)$$



Kuva 1. Kuvälähteiden muuttaminen jatkuvaksi jakautumaksi

Tehokäyrän pisteeseen P synnyttämä äänen kokonaisintensiteetti I saadaan integroimalla yhtälö 4 arvosta $x = 0$ arvoon $x = \infty$. Yhtälö ei integroidu alkeisfunktioiden avulla. Vaihdetaan muuttujaksi kulma θ , ja tehdään lisäksi seuraavat yksinkertaistukset:

$$\tan(\theta) \approx K(\theta) \text{ ja } r = a\sqrt{1 + \tan^2(\theta)} \approx a\left(1 + \frac{\theta}{3}\right) \quad (5)$$

K on heijastuskertoimesta β riippuva kerroin $1 \rightarrow$. Integraali on nyt muotoa:

$$I = \frac{B}{4\pi} \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} K(\theta) \times \beta^{\frac{aK(\theta)}{H}} \times e^{-ma(1+\frac{\theta}{3})} d\theta \quad (6)$$

Äänen intensiteetti vastaanottpisteessä P , etäisyydellä a todellisesta äänilähteestä on:

$$I = \frac{W\beta(\ln \beta)^2}{\pi H(1 - \beta)^2} \frac{-3K \times e^{-ma}}{a^2(Hm - 3K \ln \beta)^2} \left\{ \beta^{\frac{aK\pi}{2H}} e^{-\frac{ma\pi}{6}} \left[(H(am \frac{\pi}{2} + 3) - 3aK \frac{\pi}{2} \ln \beta) \right] - 3H \right\} \quad (7)$$

2.3 Äänen kokonaisintensiteetti ja äänenpainetaso vastaanottpisteessä

Otetaan huomioon myös suoraan tullut ääni. Äänen intensiteettitaso ja äänenpainetaso määritelmien perusteella saadaan:

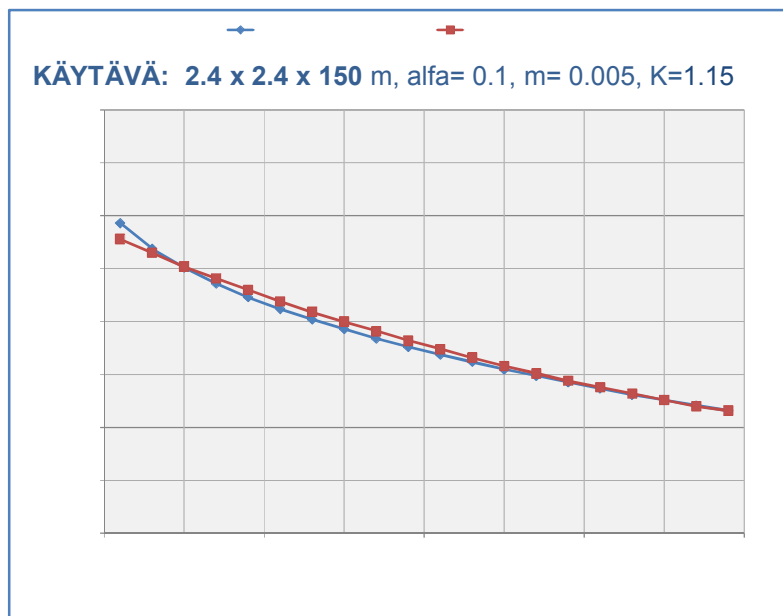
$$L_p = L_w + 10 \lg \left[\frac{e^{-am}}{4\pi \times a^2} \left\{ 1 - \frac{12K\beta(\ln \beta)^2}{H(Hm - 3K \ln \beta)^2 (1 - \beta)^2} \right\} \right] \times \left[\left\{ \beta^{\frac{a\pi}{2H}} \times e^{-\frac{am\pi}{6}} \left[H(am \frac{\pi}{2} + 3) - 3aK \frac{\pi}{2} \ln \beta \right] - 3H \right\} \right] \quad (8)$$

3 TULOKSET

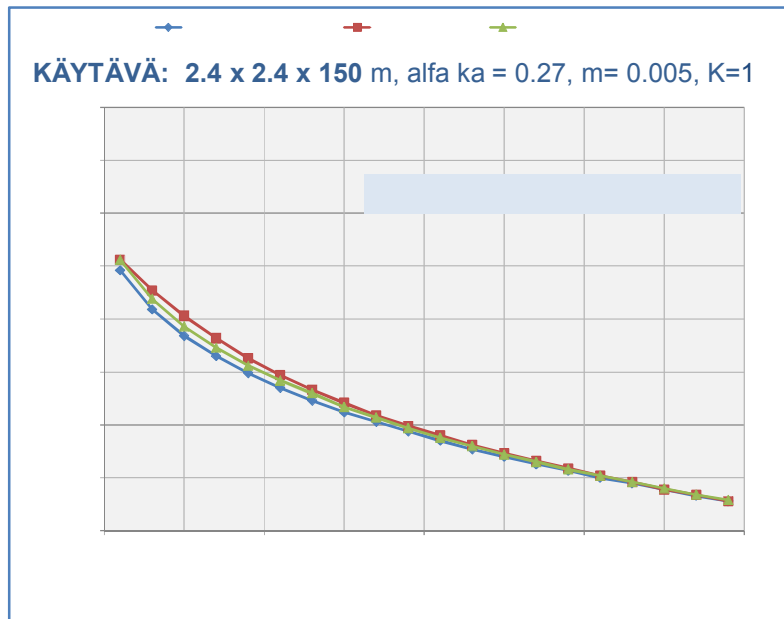
Kuvissa 2 ja 3 on esitetty kaavalla 8 ja AKUSTI- ohjelmalla lasketut äänitasot akustisesti kovassa sekä vaimennetussa käytävässä. Kuvassa 4 on mukana myös mittaustulos.

Käytävällä, jossa kaikkien neljän pinnan absorptiokerroin $\alpha = 0.1$, antaa kaava 8 lähikentässä AKUSTI- ohjelmaa pienempiä arvoja, kuva 2. Etäisyydellä 15–55 metriä äänilähteestä kaavan arvot ovat maksimissaan 0.7 desibeliä ohjelman arvoja suuremmat. Kaukana äänilähteestä ero on alle 0.5 desibeliä.

Vaimennetussa käytävässä, kun laskennassa käytetään pintojen keskimääräisenä absorptiokerrotoimena arvoa $\alpha = 0.27$, kaavan arvot ovat 10–30 metrin etäisyydellä maksimissaan desibelin ohjelman arvoja suuremmat, kuva 3. Muualla ero on alle 0.5 desibeliä. Jos laskennassa käytetään todellista absorptiojakautumaa (katon $\alpha = 0.9$, muut pinnat $\alpha = 0.1$), on ero ohjelmalla laskettujen ja kaavan arvojen välillä käytävän alkuosassa maksimissaan 1.8 desibeliä. Käytävän loppuosassa ovat tulokset yhtenevät, kuva 3.

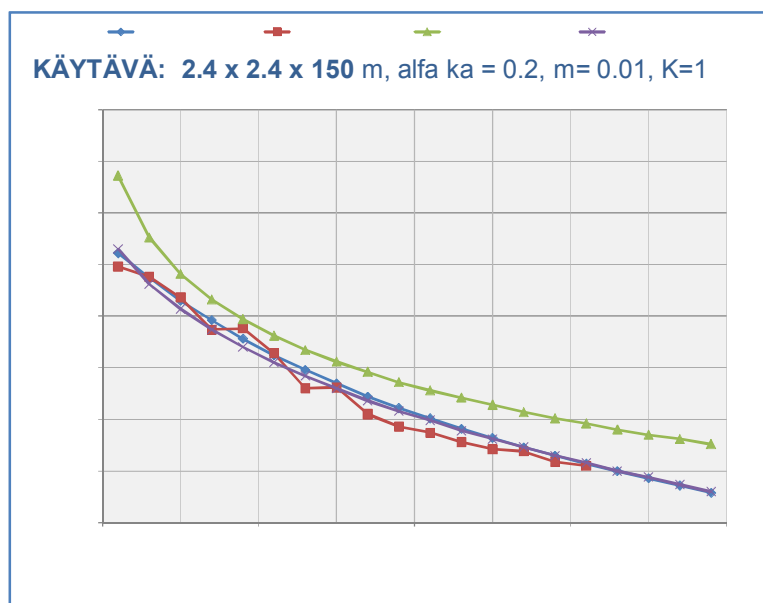


Kuva 2. Akustisesti kovan käytävän lasketut äänitasot



Kuva 3. Vaimennetun käytävän lasketut äänenpainetasot

Käytävällä tehdyissä mittauksissa suurin poikkeaman itseisarvo kaavalla 8 laskettujen ja mitattujen A-äänitasojen välillä oli 1.8 desibeliä, kuva 4. Käytävällä äänen etenemiseen vaikuttivat palo-ovien karmit sekä käytävän pienet levennykset. Kuvassa 4 on myös esitetty Kuttruffin kaavalla lasketut käytävän äänitasot [7]. Kuttruffin kaava ei ota huomioon ilman vaimennusta.



Kuva 4. Pitkän käytävän mitatut ja lasketut äänitasot

4 POHDINTA

Uusimmat kaupalliset akustiset mallinnusohjelmat ovat monipuolisia ja tehokkaita, mutta vaativat käyttäjältään erikoisosaamista, mikä rajoittaa niiden käyttöä pienissä rakennusprojekteissa. Lyhytkestoisissa meluntorjuntatoissa nämä mallinnustyökalut ovat usein havaittu liian raskaiksi, vaikka niiden käytöstä olisikin hyötyä. Ohjelmat soveltuvat pikemminkin akustiikan tutkimustyöhön kuin insinöörien ja suunnittelijoiden työkaluiksi. Tässä työssä on kehitetty nopea laskentamenetelmä pelkistettyjen tilojen kuten käytävien, luokkahuoneiden, voimistelusalien tai avotoimistojen akustiseen suunnitteluun. Yksinkertaisella leviämismallilla voidaan nopeasti arvioida huoneakustisten ratkaisujen vaikutus tilan äänitasoon ja antaa perustiedot vaativammalle akustiselle suunnittelulle.

5 YHTEENVETO

Tutkimuksessa johdetulla äänenleviämisen kaavalla 8 lasketut tulokset poikkesivat tarkasta laskennassa ja mittaustuloksista käytävän alkuosassa alle kaksi desibeliä. Kaukana äänilähteestä poikkeamat olivat alle desibelin. Jos tarkastelupiste on hyvin etäällä äänilähteestä ja ilman vaimennus unohdetaan, sekä $\tan(\theta)$ approksimaationa käytetään muuttujan (θ) arvoa, on kaava 8 sama, kuin Kuttruffin sarjakehitelmään perustuva kaava.

VIITTEET

1. Keränen, J., Hongisto, V. (2010): Comparison of Simple Room Acoustic Models Using for Industrial Spaces. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 96 (2010), 179-194.*
2. Keränen, J., Airo, E., Olkinuora, P., Hongisto, V. (2003): Validity of Ray-Tracing Method for the Application of Noise Control in Workplaces. *Acta Acustica United with Acustica Vol. 89 (2003), 863-874.*
3. Kang, J. (2002): Acoustics of Long Spaces, Theory and Design Practice. *Thomas Telford Publishing 2002.*
4. Kang, J. (1996): Reverberation in Rectangular Long Enclosures with Geometrically Reflecting Boundaries. *ACUSTICA / Acta Acustica Vol. 82 (1996), 509-516.*
5. Kuronen, J. (1998): Teollisuushallin melukentän kuvaaminen. Erityisesti akustiseen kuvatekniikkaan perustuvalla QAkusti -tietokoneohjelmalla. *Lisensiaatintutkimus, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu 1998, Lappeenranta.*
6. Kuronen, J. (1986): Mirror Method in Noise Control. *The Changing Nature of Work and Workforce. Third Joint U.S.-Finnish Science Symposium, Kentucky, USA (1986), 39-42.*
7. Kuttruff, H. (1989): Stationäre Schallausbreitung in Langräumen. *Acustica, Vol. 69(1989), 53-62.*