

ILMASTOINNIN VIRTAUSÄÄNEN LASKENTA

Pekka Saarinen

Työterveyslaitos
Lemminkäisenkatu 14–18 B
20520 Turku
pekka.saarinen@ttl.fi

1 JOHDANTO

Koska melutasovaatimukset ovat nykyisin kireät, on myös ilmastoinnin meluhaittoihin alettu kiinnittää entistä enemmän huomiota. Järkevintä tämä olisi tehdä jo suunnittelu- ja tuotekehitysvaiheessa, mikä kuitenkin edellyttää toimivia laskentamenetelmiä, joilla ilmastointikanaviston eri osien meluntuottoa eri kuormitustilanteissa pystytään arvioimaan etukäteen. Tällaisia menetelmiä onkin kirjallisuudessa jonkin verran, mutta hajallaan ja usein puutteellisesti dokumentoituina. Tämä raportti perustuu MAKSI-tutkimushankkeen virtausääniosioon, jossa tätä puutetta pyrittiin korjaamaan keräämällä tietoa olemassa olevista virtausmelun mallinnusmenetelmistä ja jossa myös validoitiin mittauksin lupaavimpia menetelmiä.

Virtausmelun laskentamenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen eri ryhmään, jotka ovat analyyttisiin laskentakaavoihin perustuvat, tiettyyn geometrialtaan yksinkertaiseen melunlähdeyyppiin rajoittuvat menetelmät sekä yleisemmät, numeeriseen virtaussimulointiin (CFD) nojaavat menetelmät. MAKSI-hankkeessa pääpaino oli ensin mainitussa ryhmässä, sillä numeeriseen virtauslaskentaan perustuvat menetelmät ovat vaikeakäyttöisiä ja vaativat raskaita tietokoneohjelmistoja. Niitäkin hankkeessa käsiteltiin jonkin verran, rajoittuen kuitenkin aika-riippumattomaan virtaussimulointiin. Tässä raportissa esitetään tiivistetyt ohjeet yksinkertaisten virtausmelun mallinnustyökalujen käytöstä.

2 ANALYYTTISET VIRTAUSMELUN LASKENTAMALLIT

Kehittyneimpiä analyyttisiä työkaluja virtausmelun laskemiseksi ovat nk. paineriippuvat laskentamenetelmät, jotka perustuvat aeroakustiikan perusteoriaan ja ovat siksi yleisempiä kuin puhtaasti empiiriset laskentatyökalut. Nämä menetelmät antavat kanavavirtausmelun koko tehospektrin ja ovat yleensä muunnelmia Nelsonin ja Morfeyn menetelmästä [1], joka pätee suorakaidekanavissa sijaitseville liuska- ja rakoesteille. Kyseinen menetelmä puolestaan saadaan yhdistämällä seuraavat kaksi tulosta:

1. Nelson ja Morfey johtivat mielivaltaiselta taajuuskaistalta $[f_c / \alpha, \alpha f_c]$ kertyvälle, esteestä jompaankumpaan suuntaan säteilevälle äänitoholle lausekkeen

$$P_z(f_c) \approx \begin{cases} \frac{1}{A\rho_0c_0} F_{z,\text{rms}}^2(f_c) , & f_c < f_0 \\ \frac{2\pi f_c^2}{3\rho_0c_0^3} \left(1 + \frac{3c_0}{8f_c} \frac{a+b}{A}\right) F_{z,\text{rms}}^2(f_c) , & f_c > f_0 \end{cases} \quad (1)$$

missä a ja b ovat kanavan sisäpuolinen leveys ja korkeus sekä A sen sisäpoikkipinta-ala. Rajataajuutta $f_0 = \frac{c_0}{2 \max\{a, b\}}$ suuremmilla taajuuksilla kanavaan virittyy myös poikittaisia värähtelymoodeja. Voima $F_{z, \text{rms}}(f_c)$ on tarkasteltavalta taajuuskaistalta kertyvän, virtausesteen toiselle pinnalle kohtisuoraan vaikuttavan fluktuoivan voiman neliöllinen aikakeskiarvo.

2. Nelson ja Morfey oletivat, että virtausesteen pinnalla vaikuttava voimakomponentti $F_{z, \text{rms}}(f_c)$ on suoraan verrannollinen esteessä tapahtuvan painehäviön Δp aiheuttamaan voimaan $\bar{F}_z = A\Delta p$ siten, että verrannollisuuskerroin K riippuu taajuuskaistasta, ts. (kts. myös kuva 1)

$$F_{z, \text{rms}}(f_c) = \frac{1}{2} K(f_c) \bar{F}_z = \frac{1}{2} K(f_c) A \Delta p . \quad (2)$$

Nelson ja Morfey havaitsivat, että jos verrannollisuuskerroin K esitetään kaistan keskitaajuuden f_c sijasta Strouhalin luvun $St = \frac{f_c (a - a_{\text{free}})}{U_c}$ funktiona (U_c on keskimääräinen virtausnopeus virtausesteen aukossa), niin saatu funktio $K(St)$ ei juurikaan riipu virtausnopeudesta eikä kanavan ja virtausesteen koosta. Juuri tämä seikka mahdollistaa yleispätevän meluntuotokaavan johtamisen. Funktio $K(St)$ skaalautuu sen mukaan, minkä levyisiltä taajuuskaistoilta äänitehot ilmoitetaan. Yleensä taajuuskaistojen koko on 1/1 tai 1/3 oktaavia, jolloin vastavasti kaistanleveysparametri $\alpha = 2^{1/2}$ tai $\alpha = 2^{1/6}$.

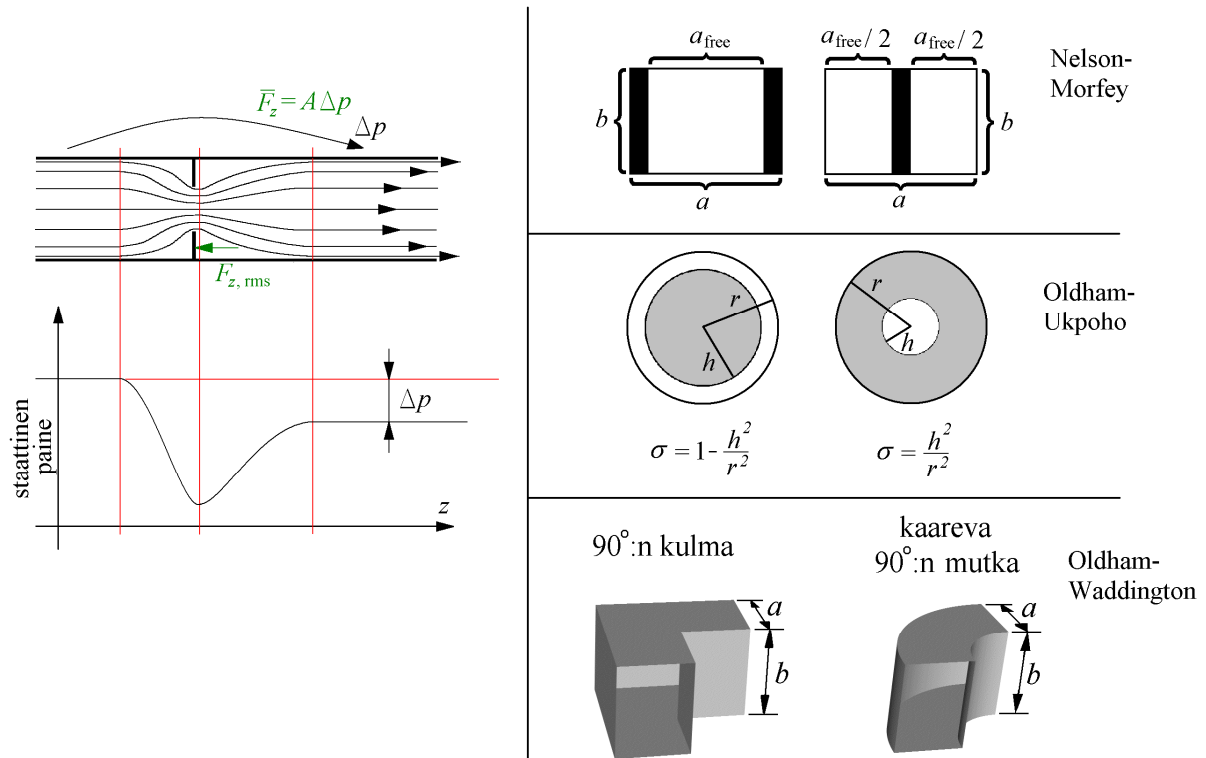
Yhdistämällä yhtälöt (1) ja (2) ja ilmoittamalla teho desibeliasteikolla saadaan Nelsonin ja Morfeyn meluntuotokaava suorakaidekanavien liuska- ja rakoesteille:

$$L_w(f_c)[\text{dB}] = \begin{cases} 120 + 20 \log K(St) + 10 \log \left[\frac{A(\Delta p)^2}{4\rho_0 c_0} \right], & f_c \leq f_0 \\ 120 + 20 \log K(St) + 10 \log \left[\frac{\pi A^2 f_c^2 (\Delta p)^2}{6\rho_0 c_0^3} \right] + 10 \log \left[1 + \frac{3c_0 \phi}{16A f_c} \right], & f_c > f_0 \end{cases} \quad (3)$$

Symbolilla ϕ on merkitty kanavan sisäympärysmittaa $2(a + b)$. Merkintä on otettu käyttöön siksi, että sen avulla melukaava yleistyy sellaisenaan myös pyöreiden kanavien rengas- ja kiekkoesteille, jolloin $\phi = 2\pi r$ [2]. Tässä yleistyksessä kuitenkin Strouhalin luvun ja rajataajuuden laskenta muuttuu siten, että $St(f_c, U_c, \sigma) = \frac{f_c \pi r (1 - \sigma)}{2U_c}$ (aukkosuhde σ on vir-

tausesteen aukon pinta-alan suhde koko kanavan poikkileikkauspinta-alaan, ts. $\sigma = A_{\text{aukko}} / A$) ja rajataajuus $f_0 = \frac{100 \text{ m}}{r} \times 1 \text{ Hz}$. Kaavaa (3) on käytetty myös suorakaidekanavissa sijaitsevien mutkapalojen meluntuoton ennustamiseen [3]. Tällöin rajataajuus lasketaan samoin kuin Nelsonin ja Morfeyn menetelmässä ja $St = \frac{f_c d}{U_c}$, missä virtausesteen ominaisuus

$d = \left(1 - \frac{C_L^{1/2} - 1}{C_L - 1}\right) \frac{A}{a}$. (Kts. C_L :n määritelmä alla.) Nelsonin ja Morfeyn menetelmän ja siitä johdettujen menetelmien käsittelemät virtausesteet on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1.

vasemmalla: Nelsonin ja Morfeyn menetelmä perustuu oletukseen, että esteen yhdelle pinnalle vaikuttava fluktuoiva voima $F_{z,rms}$ on jokaisella taajuudella erikseen verrannollinen esteen yli vallitsevaa painehäviötä vastaavaan voimaan \bar{F}_z .
oikealla: Virtausesteet, joihin Nelsonin ja Morfeyn menetelmää on sovellettu vain vähäisin muunnoksien.

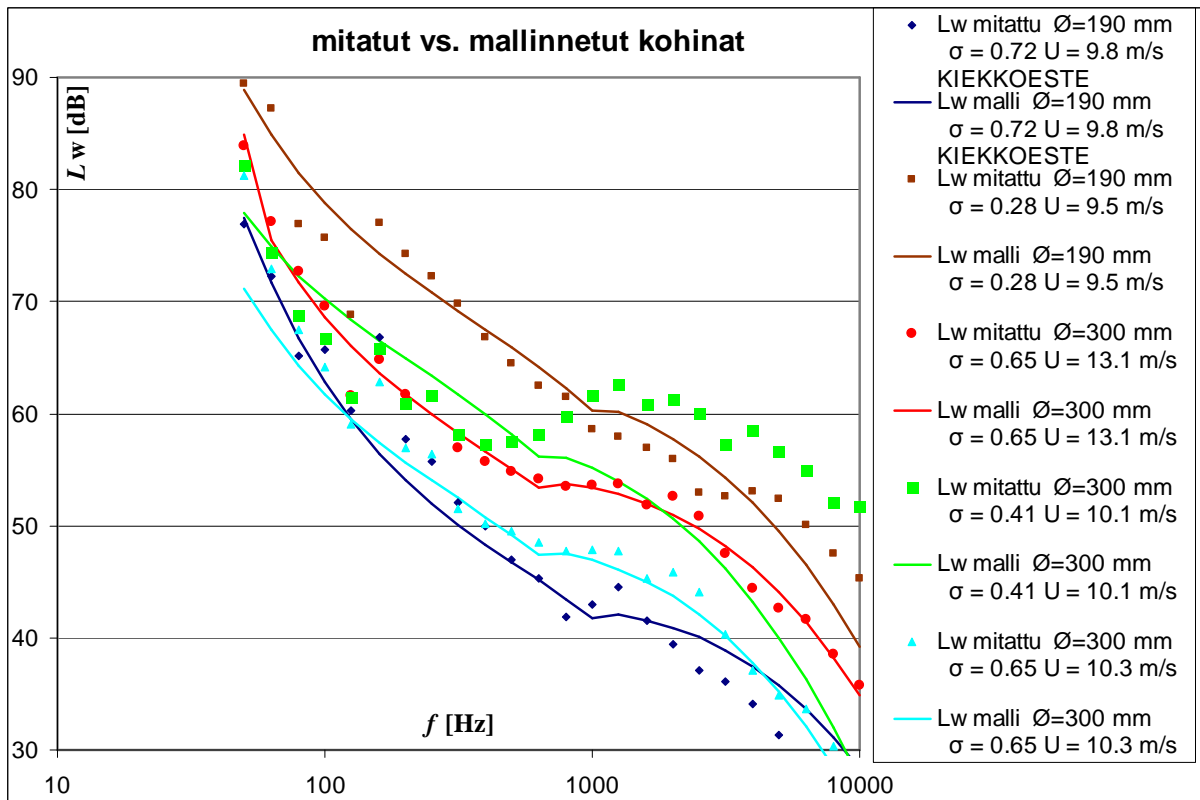
Yhtälössä (3) funktio $K(St)$ (tai $120 + 20 \log[K(St)]$) voidaan tulkita eräänlaiseksi oletusspektriksi, ja sen jälkeen tulevat termit ovat korjaustermejä, joiden avulla otetaan huomioon kanavan ja virtausesteen koko sekä ilman virtausnopeus kanavassa. Ennen kuin yhtälöä voidaan käyttää meluntuoton ennustamiseen, on siis tunnettava tämä oletusspektri. Tämä taas edellyttää mittausta vähintään yhdessä koetilanteessa. Kun yhtälöä käytetään virtausmelun ennustamiseen, tarvitaan lisäksi jokin ennuste virtausesteessä syntyvälle painehäviölle Δp . Tässä voidaan käyttää apuna painehäviökerrointa C_L , joka on lähes riippumaton virtausnopeudesta. Sen avulla (q on ilmapirta ja $U = \sigma U_c$ on vapaa, ts. virtausesteen ulkopuolinen, virtausnopeus)

$$\Delta p = C_L \frac{1}{2} \rho_0 U^2 = C_L \frac{1}{2} \rho_0 \frac{q^2}{A^2} . \quad (4)$$

Painehäviökerroin voidaan laskea samasta mittauksesta, jota käytetään oletusspektrin $K(St)$ etsimiseen, minkä jälkeen painehäviö muilla virtausnopeuksilla voidaan helposti laskea. Ongelmana kuitenkin on, että painehäviökerroin riippuu virtausesteen aukkosuhteesta σ ja muuttuu, jos aukkosuhde muuttuu. Tällöin tarvitaan teoreettista tietoa C_L :n ja σ :n keskinäisestä riippuvuudesta. Tätä riippuvuutta voidaan varsin hyvin kuvata yhtälöllä

$$C_L = \frac{k_1}{\sigma^2} - \frac{k_2}{\sigma} + k_3 . \quad (5)$$

MAKSI-hankkeessa suoritettujen mittausten perusteella pyöreissä kanavissa sijaitseville ren- gas- ja kiekkoesteille voidaan käyttää kertoimia $k_1 = 3.01$, $k_2 = 7.10$ ja $k_3 = 5.39$.



Kuva 2. Oldhamin ja Ukpohon mallin ennustamia äänitehospektrejä (käyrät) verrattuina mit- taustuloksiin (samanväriset datapisteet). Yhdessä koetilanteista virtausesteenä on kanavan keskellä sijaitseva pyöreä kiekko ja muissa tilanteissa rengaseste, jonka keskellä on pyöreä aukko. Oletusspektri on määrätty sovittamalla kuvan punainen käyrä mittaustuloksiin. Ääni- tehot on laskettu 1/3-oktaavikaistoittain.

Yleisesti ottaen virtausesteen tuottama äänitehospektri voidaan ennustaa yhtälöiden (3), (4) ja (5) avulla, kun tunnetaan kanavan muodosta (pyöreä/suorakaide) ja virtausesteen tyypistä riippuvat oletusspektri $K(St)$ sekä dimensiottomat parametrit k_1 , k_2 ja k_3 . Kuvassa 2 on esitetty MAKSI-hankkeessa mitattuja pyöreiden kanavien rengas- ja kiekkoesteiden tuottamia äänitehospektrejä, joita on verrattu Oldhamin ja Ukpohon mallin antamiin ennusteisiin. Oletusspektri on saatu sovittamalla ennuste ja mittaukset yhteen tilanteessa, jossa kanavan sisähalkaisija $\phi = 300$ mm, reikäesteen aukkosuhde $\sigma = 0.65$ ja vapaa virtausnopeus $U = 13.1$ m/s (punaiset mittausdatat ja käyrä). Painehäviö puolestaan on ennustettu käyttäen yhtälöitä (4) ja (5). Kuvasta nähdään, että ennustettu äänitehospektri on melko hyvä silloinkin, kun aukkosuhteen ja virtausnopeuden lisäksi myös kanavan kokoa on muutettu (ruskea käyrä). Tämä pätee jopa silloin, kun rengaseste on lisäksi korvattu kiekkoesteellä (tummansininen käyrä). Jos taas kanavan koko ja aukkosuhde on pidetty ennallaan, mutta virtausnopeutta muutettu, ennuste on edelleen pysynyt melko tarkkana (vaaleansininen käyrä). Sen sijaan, kun aukkosuhdetta on merkittävästi pienennetty säilyttäen kanavan koko, mitattu spektri on voimistunut selvästi suurilla taajuuksilla (vihreät datat). Jos tämä ilmiö on todellinen, se on piirre, jota malli ei ole pystynyt ennustamaan.

Erilaisille kanavien virtausestetyypeille johdettuja laskentakaavoja on koottu myös ASHRAEn ja SMACNAn julkaisemiin ilmastoinnin suunnittelukäsikirjoihin. Näistä SMACNAn vuoden 1990 käsikirja on ladattavissa myös internetistä [4]. Käsikirjakaavojen virtausesteitä ovat kaareva mutka, kulma, haarakohta sekä myös suora putki. Yhteistä näille esteille on, että ne eivät sisällä reikälevyjä eivätkä muita ahtaumia eikä niillä niin muodoin ole myöskään varioitavaa aukkosuhdetta. Näin ollen painehäviökerroin C_L on kullekin estetyypille kiinteä ja painehäviö Δp riippuu ainoastaan virtausnopeudesta U , joka kaavoihin onkin otettu painehäviön asemesta. Kaavoja on myös yksinkertaistettu siten, että rajataajuuden f_0 ala- ja yläpuolisia taajuuksia ei ole käsitelty erikseen. Käsikirjakaavat voidaan esittää yleisessä muodossa

$$L_w [\text{dB}] = Fg(St) + 10 \log \left(\frac{A}{1 \text{ m}^2} \right) + 10 \log \left(\frac{D}{1 \text{ m}} \right) + C_1 \log \left(\frac{U [\text{m/s}]}{Be} \right) + 10 \log \left(\frac{f_c}{63 \text{ Hz}} \right) - C_2 + \Delta L_{wp} + \Delta L_{wt} \quad (6)$$

Oletusspektrille on tässä käytetty merkintää $Fg(St)$, koska se ei ole tarkalleen $K(St)$:n määritelmän mukainen. Yhtälössä (6) esiintyvien suureiden laskentasäännöt löytyvät MAKSI-projektin virtausääniosion raportista [5]. Oletusspektrit $Fg(St)$ löytyvät graafisessa muodossa myös T. Marksinkin artikkelista [6].

3 NUMEERISEEN VIRTausLASKENTAAN PERUSTUVAT LASKENTAMALLIT

Numeeriseen virtauslaskentaan perustuva virtausäänen tuoton mallinnus edellyttää periaatteessa virtaustilanteen simulointia aikariippuvana suurella paikka- ja aikaresoluutiolla. Tämä vaatii hyvin paljon tietokonelaskentatehoa, joten MAKSI-hankkeessa tyydyttiin tutkimaan olisiko yksinkertaisemmasta, virtauskentän aikariippumattomasta tasapainosimulaatiosta mahdollista laskea jonkinlaisia virtausmelun kanssa korreloivia tunnuslukuja, jotka voisivat antaa osviittaa siitä missä melu syntyy ja mikä vaihtoehtoisista teknisistä toteutuksista olisi hiljaisin. Tätä varten tarkasteltiin virtausäänen syntyä kuvaavan, ns. Lighthillin aaltoyhtälön aikaderivointia sisältämättömiä lähdetermejä. Tällöin päädyttiin kahteen erilaiseen suureen, jotka todennäköisesti korreloivat meluntuoton kanssa. Nämä ovat paineen gradienttivek-

torin normi $\|\nabla p\|$ ja turbulenssin kineettisen energian tiheys k , jotka virtauskentän tasapainoratkaisu antaa koko ratkaisualueella. Todennäköisesti melua syntyy eniten paikoissa, joissa nämä suureet saavat suurimpia arvoja. Äänen kokonaistuottoa arvioitaessa edellinen suure tulee integroida yli pintojen ja jälkimmäinen tilavuusintegraalina pintojen lähialueelta. Näin saadaan kokonaisäänitehon arviointia varten tunnusluvut $\oint_{\text{esteen pinnat}} \|\nabla p\| dS$ ja $\iiint_{\text{esteen pintojen lähialue}} k dV$. Näitä lu-

kuja verrattiin mitattuihin kokonaisäänitehoihin erilaisten yksinkertaisten virtausesteiden tapauksissa. Tulosten perusteella eniten ääntä tuottavien virtausesteiden tapauksissa myös tunnusluvut olivat suurimmat [5]. Suoritettu koesarja ei kuitenkaan vielä riitä kertomaan, ovatko nämä tunnusluvut hyödyllisiä myös monimutkaisemmissa tilanteissa, kuten todellisten ilmastoinnin päätelaitteiden meluntuottoa minimoitaessa.

VIITTEET

1. NELSON P A & MORFEY C L, Aerodynamic sound production in low speed flow ducts, *J. Sound Vib.* **79**(2), 263-289 (1981).
2. OLDHAM D J & UKPOHO A U, A pressure-based technique for predicting regenerated noise levels in ventilation systems, *J. Sound Vib.* **140**(2), 259-272 (1990).
3. OLDHAM D J & WADDINGTON D C, Noise generation in ventilation systems by the interaction of airflow with bends and branch take-offs, *Internoise 2004, The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, August 2004, Prague, Czech Republic.
4. <http://d.scribd.com/docs/94d0n6tb1we5mkcej8i.pdf>
SMACNA, *HVAC Systems Duct Design*, Third Edition, 1990.
5. SAARINEN P, *Ilmastoinnin virtausäänen laskenta*, Työympäristötutkimuksen raporttisarja 39, Työterveyslaitos, Helsinki, 2009.
6. MARKS T M, Explicit formulas for the calculation of regenerated noise in ducts, *Internoise 2004, The 33rd International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, August 2004, Prague, Czech Republic.