

ÄÄNEKKÄÄMMÄN KANTELEEN SUUNNITTELU JA ANALYYSI

Henri Penttinen (1), Jyrki Pölkki (2), Vesa Välimäki (1), Matti Karjalainen (1) ja Cumhur Erkut (1)

(1)Teknillinen korkeakoulu, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio
PL 3000, FI-02015 TKK
Etunimi.Sukunimi@tkk.fi – <http://www.acoustics.hut.fi/>

(2) Soitinrakentajat AMF
Tuikkalantie 2, 79100 Leppävirta
jyrki.polkki@estelle.fi – <http://www.soitinrakentajatamf.fi/>

1 JOHDANTO

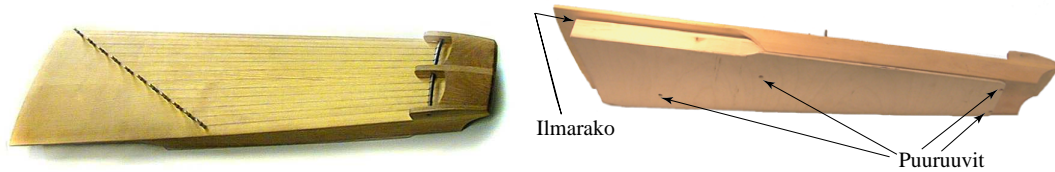
Soitinrakentajien keskuudessa on muutaman sadan vuoden aikana ollut trendi ja pyrkimys rakentaa äänekkäämpiä soittimia. Tämä johtuu suurempien yleisömaajien tavoittelusta ja suurempien soittotilojen käytöstä. Eräs esimerkki tästä trendistä on pianon kehitys: klavikordi - cembalo - piano. Vastaavasti viulun kaulaa on pidennetty, kielet ovat suuremmassa jännityksessä ja bassopalkkia on pidennetty ja vahvennettu barokin jälkeen. Tässä artikkelissa käsitelty työ jatkaa tätä kehitystä kanteleiden yhteydessä.

Artikkelimme esittelee suunnittelusäännöt äänekkäämmän kanteleen rakentamiselle sekä niiden mukaan rakennetun kanteleen analyysituloksia. Säännöt äänekkäämmän kielisoittimen tekemiselle ovat (I) kielen jännityksen lisääminen, (II) säteilevän pinta-alan lisääminen ja (III) muodostaa ilmatila erillispohjalla, joka jättää ilmaraon kannen ja pohjan väliin. Säännöt (I) ja (II) ovat monelle musiikkiakustikolle tuttuja, mutta kolmas sääntö on omalaatuisempi, sillä se mahdollistaa kannen vapaareunaisen värähtelyn. Suunnittelusäännöt varmennetaan analyttisin menetelmin, akustisin mittaustuloksien sekä kuuntelukokein. Kahden kuuntelukokeen tulokset esitetään. Nämä tulokset osoittavat, että voimakkaat näppäykset muunnellussa kanteleessa havaitaan keskimäärin 3 dB äänekkäämpänä kuin perinteisessä kanteleessa. Tulokset on julkaistu aiemmin [1].

Artikkelissa esitellään siis yhteistyön tuloksia soitinrakentaja Jyrki Pölkin ja TKK:n akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorion välillä. Jyrki Pölkin rakentamia äänekkäämpiä kanteleita käyttävät ammattimuusikot ympäri Suomea.



Kuva 1: Perinteinen 10-kielinen kantele päältä ja viistosti alta kuvattuna.



Kuva 2: Muunneltu 11-kielinen kantele päältä ja viistosti alta kuvattuna.

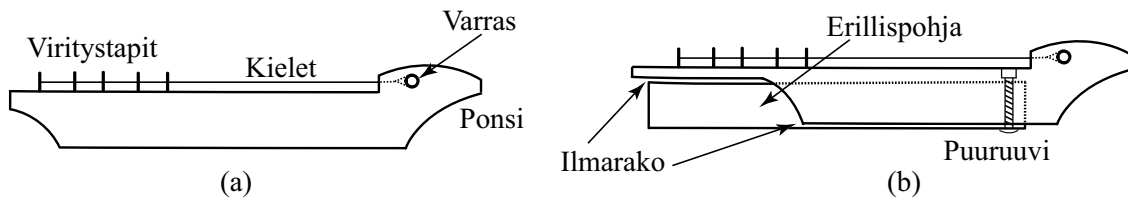
2 KANTELEIDEN RAKENTEET

Kuvassa 1 on esitetty perinteinen kantele, jota on käytetty tässä tutkimuksessa ja kuva 2 esittää muunneltua kanteleä. Suunnittelusääntö (II), pinta-alan lisääminen, näkyy selkeästi muunnellussa kanteleessa jatkettuna lapana, kun kanteleä tarkkaillaan päältä päin. Näkymä viistosti alhaalta havainnollistaa sääntöä (III), erillispohjaa näkyy kuvassa 2. Erillispohjaa ja ilmarakoa havainnollistaa tarkemmin kuva 3, jossa on poikkileikkaus molemmista kantelemalleista.

3 SUUNNITTELUPERIAATTEET

3.1 Suunnitteluperiaatteet kielille

Ensimmäinen askel kohti äänekkäämpää kanteleä on nostaa kielen jännitystä. Käytännössä tämä on sama kuin, että säilytetään kielen perustaajuus samana ja pidennetään kieliä.



Kuva 3: Poikkileikkaus (a) perinteisestä ja (b) muunnellusta kanteleesta.

Muunnellussa kanteleessa kaikkien kielten pituuksia on kasvatettu. Uudessa mallissa jännitystä on nostettu keskimäärin noin 27 %, joka on 70% kielen katkeamispisteestä.

Muutosta voimaan, joka kohdistuu viritys tappiin voidaan arvioida laskemalla. Muutokset tähän voimaan aiheutuvat kielen poikkeaman määrästä ja kielen pituudesta. Poikittainen voima, joka kohdistuu viritystappiin (engl. tuning pin), voidaan laskea seuraavasti

$$f(L) = T \frac{dz}{dx} \Big|_{x=L}, \quad (1)$$

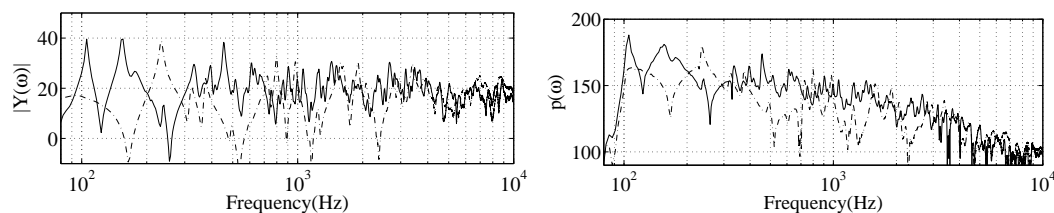
missä L on kielen pituus x -akselin suunnassa ja z on kielen poikkeuma, täten dz/dx on kulmakerroin. Kanteleen soittaja määrää tämän kulmakertoimen muuttamalla poikkeutuksen määrää. Mittasimme ammattisoittajan aiheuttamaa poikkeutusta molemmille soittimille. Tämän perusteella pystymme sanomaan, että herätevoima on muunnellussa kanteleessa keskimäärin 20 % ($\pm 4\%$) suurempi kuin perinteisessä mallissa.

Tämä herätevoima laittaa kanteleen kannen värähtelemään taajuusriippuvasti. Tätä taajuusriippuvaa värähtelyn määrää kuvaa viritystappin mekaaninen tuloadmittanssi $Y(\omega)$. Se määräytyy kanteleen rakenteesta eli kaksi eri muotoista kanteletta omaavat erilaisen tuloadmittanssin. Tästä syystä esittelemme ensin rakenteelliset suunnittelusäännöt, enne kuin menemme mitattuihin admittanssi funktioihin.

3.2 Rakenteelliset suunnittelusäännöt

Aiemmissa kantelemittauksissa huomasimme [2], että merkittävä määrä värähtelyenergiaa siirtyy soittimen sivuille ja sitä kautta pohjaan. Alustavat kokeilut 10-kielisen kanteleen kohdalla vahvistavat tämän havainnon. Tyypillisessä soittoasennossa, jossa kantele on poikittain ja vinosti soittajan sylissä, kanteleen sivut on tuettu jalkaa tai kättä vasten, jolloin osa värähtelyenergiasta hukataan. Yksi suunnittelupäämäärästä oli välttää tämä. Tämä voidaan saavuttaa eristämällä kansi pohjasta siten, että pohja kiinnitetään soittimeen sen keskiosasta. Kannen reunat jäävät vapaiksi pienen ilma-avaruuden avulla.

Toinen suunnittelupäämäärä oli parantaa säteilytehokkuutta eli parantaa suhdetta sisään menevän tehon ja äänen intensiteetin välillä. Tämä voidaan saavuttaa kasvattamalla säteilypinta-alaa. Muunnellussa kanteleessa kannen vapaat reunat lisäävät myös värähtelypinta-alaa. Tuloksena on parannus perinteiseen malliin verrattuna, jossa reunat eivät juuri pääse säteilemään / värähtelemään (kuten näkyy [3]:n holografiakuvista). Toisaalta jollain taajuusalueilla säteilypinta-ala voi jakaantua värähtelyalueisiin, jotka ovat vastakkaisvaiheisia toisiinsa nähden [4]. Tämä tarkoittaisi heikennystä säteilytehon parannuksessa, mutta vain muutamille värähtelymoodeille. Tämä aihe onkin aivan oma maailmansa ja on osa tulevia tutkimuksia.



Kuva 4: Admittanssi ja tehotiheydet perinteiselle (katkoviiva) ja muunnellulle (yhtenäinen viiva) kanteleille.

4 KAIKUKOPAN VÄRÄHTELY

Selvittääksemme kanteleiden tulotehot mittasimme kummankin soittimen admittanssit seitsemännen kielen viritystapin kohdalta. Tässä yhteydessä admittanssi kuvaa soittimen kaikukopan tapaa värähdellä. Se on määritelty nopeuden ja voiman spektrien suhteena $Y(\omega) = V(\omega)/F(\omega)$. Se liittyy oleellisesti myös tulotehoon. Kuvassa 4 on esitetty perinteisen (katkoviiva) ja muunnellun (yhtenäinen viiva) kanteleen admittanssien itseisarvot $|Y(\omega)|$ sekä tehotiheydet $p(\omega)$. Muunnellun mallin tuloteho on 28 % suurempi kuin perinteisessä kanteleessa. Tämä tulos saatiin numeerisesti integroimalla tehotiheydet 100 Hz ja 10000 Hz välillä.

5 KUUNTELUKOKEET JA SOITETTAVUUS

Selvittääksemme eroja havaitussa äänekkyydessä näissä kahdessa kanteleessa suoritimme kaksi kuuntelukokeita. Ensimmäisessä kokeessa matkittiin normaalisoittilannetta, niin että soittajat soittivat ennakkoon määrättyllä tavalla hallitusti kumpaakin kannelta. Toisessa kokeessa äänitettyjä kanteleääniä soitettiin koehenkilöille ja heidän oli tarkoitus säätää jälkimmäistä ääninäytettä niin, että molemmat kuulostivat yhtä voimakkaalta.

5.1 Live kuuntelukokeen kuvaus ja tulokset

Koe suoritettiin akustiikan laboratorion kuunteluhuoneessa niin, että soittaja soitti lyhyen musiikillisen näytteen (4-6 sek.) kahdella kanteleella peräkkäin. Koehenkilöiltä pyydettiin vastaamaan kumpi näytteistä kuulosti äänekkäämmältä. Musiikillisina näytteinä käytettiin soittoa kolmella eri dynamiikkatasolla (piano pianissimo, mezzoforte ja forte fortissimo), soittamalla matalia tai korkeita kieliä ja joko herättämällä kielet näppäilemällä tai lyömällä yli kielistön (rämpyttämällä, engl. strumming). Soittajina toimi neljä ammattisoittajaa ja koehenkilöitä oli seitsemän.

Kuuntelukokeen tulokset voidaan tiivistää seuraavasti. Kaikissa mitatuissa tapauksissa paitsi yhdessä muunneltu kannel havaittiin äänekkäämmäksi. Poikkeustapaus oli se, kun

korkeita kieliä näppäiltiin hiljaa (piano pianissimo). Tämä viittaa siihen, että dynaaminen alue olisi laajempi myös alapäästä eli kun soitetaan hiljaa. Suurimmat erot äänekkyyksissä rekisteröitiin forte fortissimo soitossa ja rämpyttämällä soitettaessa. Soittajat kertoivat myös, että äänekkyysero oli helpompi havaita soittaessa kuin kuunnellessa.

5.2 Äänekkyyskuuntelukokeen kuvaus ja tulokset

Toisessa kuuntelukokeessa kaksi äänitettyä kanteleääntä soitettiin peräkkäin kuulokekuuntelussa. Koehenkilöllä oli mahdollisuus säätää jälkimmäisen äänen äänekkyyttä ± 9 dB alueella 0.5 dB askelissa. Tavoitteena oli asettaa äänet yhtä äänekkäiksi. Soitetut äänet olivat forte fortissimo näppäyksiä kaikilta kieliltä, jotka oli näpätty kohdasta, joka on 1/6 kielen pituudesta.

Kielissä perustaajuus laskee voimakkaan näppäyksen jälkeen alemmas. Tämä ominaisuus johtuu kielessä tapahtuvasta jännitysmodulaatiosta [5, 6]. Kuuntelukoetta varten tämä taajuuden lasku kompensoitiin pois, jolloin perinteisen mallin äänissä ei enää ollut perustaajuuden laskua. Näin ollen oli mahdollista tutkia perustaajuuden laskun vaikutusta näppäyksen äänekkyyshavaintoon. Voidaan näet olettaa, että oppinut kuuntelija assosioi kielen näppäysäänänen äänekkääksi, jos sen perustaajuus laskee. Molempia näytteitä soitettiin kokeessa eli perinteisen kanteleen alkuperäisiä ääniä ja sellaisia, jossa perustaajuuden lasku oli kompensoitu. Kompensointi tehtiin aikamuuttuvana murtoviiveinterpolaatona tai ns. uudelleen näytteistämällä (engl. resampling) [7].

Kuuntelukokeen tulokseksi saatiin, että perinteistä kanteletta pitää säätää keskimäärin 3 dB (2.98 dB) äänekkäämmäksi, jotta se kuulostaisi yhtä äänekkäältä kuin muunneltu malli. Lisäksi koe osoitti, että perustaajuuden laskulla ei ole suurta vaikutusta havaittuun äänekkyYTEEN. Ero alkuperäisten ja kompensoitujen äänien välillä on keskimäärin -0.09 dB keskihajonnan ollessa 1.11.

5.3 Soitettavuus

Keräsimme myös kommentteja ammattisoittajilta kanteleiden soitettavuudesta ja mittasimme dynaamista soittoaluetta. Muunnellun kanteleen pitkä lapa muuttaa hieman soittoasentoa, jonka soittajat huomasivat, mutta he pystyivät sopeutumaan tilanteeseen.

Soittajat olivat sitä mieltä, että muunneltu kantele pystyy vastaanottamaan suuremman herätevoiman muuttamatta äänenlaatua. Tämä tarkoittaa sitä, että muunnellussa kanteleessa perustaajuus ei laske voimakkailla näppäyksillä yhtä voimakkaasti kuin perinteisessä mallissa. Toisin sanoen soittimen dynaaminen alue on laajentunut.

Soittimen dynaamisen alueen laajeneminen vahvistettiin mittaamalla äänenpainetaso (SPL) soitetusta sarjasta ääniä, jossa äänekkyyttä lisättiin jokaisella näppäyksellä. Ko-

keessa voimakkain äänenpaineentaso oli noin 9 dB suurempi muunnellussa kanteleessa kuin perinteisessä mallissa.

6 KIITOKSET

Henri Penttinen tekee väitöskirjatyötään opetusministeriön ja Suomen Akatemian rahoittamassa Pythagoras-tutkijakoulussa.

VIITTEET

- [1] PENTTINEN H, ERKUT C, PÖLKKI J, VÄLIMÄKI V, & KARJALAINEN M, Design and analysis of a modified kantele with increased loudness, *Acta Acustica united with Acustica*, **91**(2005) 2, 261–268.
- [2] ERKUT C, KARJALAINEN M, HUANG P, & VÄLIMÄKI V, Acoustical analysis and model-based sound synthesis of the kantele, *J. Acoust. Soc. Am.*, **112**(2002) 4, 1681–1691.
- [3] PEEKNA A & ROSSING T D, The acoustics of carved baltic psalteries, *Acta Acustica united with Acustica*, **91**(2005) 2, 269–276.
- [4] CREMER L, *The Physics of the Violin*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 1984, p. 450. Translated by J.S. Allen from *Physics der Geige* . 1981 S. Hirzel Verlag, Stuttgart, Germany.
- [5] LEGGE K A & FLETCHER N H, Nonlinear generation of missing modes on vibrating string, *J. Acoust. Soc. Am.*, **76**(1984) 1, 5–12.
- [6] TOLONEN T, VÄLIMÄKI V, & KARJALAINEN M, Modeling of tension modulation nonlinearity in plucked strings, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, **8**(2000) 3, 300–310.
- [7] LAAKSO T I, VÄLIMÄKI V, KARJALAINEN M, & LAINE U K, Splitting the unit delay - tools for fractional delay filter design, *IEEE Signal Processing Magazine*, **13**(1996) 1, 30–60, URL for MATLAB Toolbox: <http://www.acoustics.hut.fi/software/fdtools/>.