

OBJEKTIIVISET MITTARIT SISÄKORVAISTUTEKUNTOUTUKSESSA

Teemu Koski

Sisäkorvaistutejärjestelmissä on valmiuksia monenlaisiin mittauksiin, joilla voidaan saada objektiivista tietoa laitteen toiminnasta, toimintaympäristöstä, tai kuulojärjestelmän vasteesta laitteen tuottamaan herätteeseen. Tämä luento esittelee yleisimmin kliinisessä käytössä olevat sisäkorvaistutteilla tehtävät objektiiviset mittaukset ja niiden roolit sisäkorvaistutekuntoutuksessa. Tämän luennon laajuudessa käsitellyt mittaukset voidaan karkeasti luokitella impedanssimittauksiin ja vastemittauksiin. Impedanssimittauksissa mitataan puhtaasti sähköistä ilmiötä ja niiden tyypillisin tarkoitus on tarkistaa laitteen sähköinen toiminta ja antaa tietoa elektrodiketjun toimintaympäristöstä. Vastemittauksissa mitataan kuulojärjestelmän vastetta joko akustisesti tai sähköisesti tuotetulle herätteelle. Vastemittauksien kirjo ja sovelluskenttä on laaja, ja erityyppisillä vastemittauksilla voidaan tutkia kuulojärjestelmän eri osien toimintaa eri sovelluksia ja tilanteita varten. Tässä luennossa vastemittauksien käsittely on rajattu kolmeen yleisimpään: kuulohermovaste, stapediuserfleksi ja elektrokoleografia.

Impedanssimittaukset

Toistaakseen ääntä sisäkorvaistute tuottaa halutunlaisen virran aktiivisen intrakokleaarisen elektrodin ja referenssielektrodin välille. Virran suuruus riippuu äänen tasosta, ja virtatasot hiljaisille ja voimakkailla äänillä määritellään käyttäjä- ja elektrodikontaktikohtaisesti istutesäädöissä. Niin sanotulla perinteisellä impedanssimittauksella selvitetään, minkä sähköisen vastuksen implantaatti ”näkee” kullakin kontaktilla stimuloidessaan ja se, kykeneekö implantaatti ongelmitta tuottamaan halutunlaisen virran kullekin kontaktille. Tämä kertoo implantin sähköiset toimintaedellytykset.

Impedanssimittaus on tärkeä työkalu selkeimpien laiteongelmien poissulkemiseen sekä implantin toimintaedellytysten seuraamiseen. Tämä muutaman sekunnin kestävä mittaus suoritetaan rutiinisti leikkauksessa sekä jokaisella säätökäynnillä. Mittaustuloksesta näkee mahdolliset sähköiset vikatilat, eli oikosulku kanavien välillä (engl. short circuit), jolloin kaksi elektrodikontaktia ovat sähköisesti kontaktissa keskenään, sekä avoin piiri (engl. open circuit), joka voi johtua mm. katkenneesta johtimesta tai ilmakuplasta elektrodikontaktin päällä. Koska nämä impedanssin ääritilat ovat tyypillisesti - ilmakuplaa lukuun ottamatta - laitevikoja, impedansseista puhuttaessa toisinaan nousee esiin se harhakäsitys, että kaikki epätyypilliset impedanssilöydökset olisivat laitevikoja.

Impedanssiin kuitenkin vaikuttaa kaikki elektrodikontaktin ja referenssielektrodin väliltä mahdollisesti löytyvät elementit (proteiinikerros, arpikudos, luukudos, perilymfa, jne.) ja niiden mahdolliset muutokset. Esimerkiksi paikallinen arpi- tai luukudoksen muodostuminen voi kasvattaa impedanssiarvoja tietyillä elektrodikontakteilla. Lisäksi laitteen käyttämättömyys tai tietyt terveydentilan tai lääkityksen muutokset voivat joskus vaikuttaa impedanssiarvoihin. Impedanssi voidaan siis mieltää tietynlaiseksi biomarkkeriksi (kts. esim. Choi et al. 2017 & Shaul et al. 2019). Elektrodikontaktien impedanssi voi vaihdella merkittävästi käyttäjäkohtaisesti ja joskus myös ajan mukaan ja/tai elektrodikontaktien välillä. Toisaalta, impedanssimittauksen teknisessä toteutuksessa voi olla myös implanttivalmistajakohtaisia eroja. Näin ollen impedanssiarvojen vertailu käyttäjien välillä ei välttämättä ole mielekästä, vaan mittaustulos tulee tulkita kontekstissaan.

Yllä kuvatun perinteisen impedanssimittauksen lisäksi viime aikoina on tullut saataville myös monipuolisempia impedanssiin perustuvia mittauksia. Niin sanotulla impedanssitomografialla on mahdollista tutkia stimulaation leviämistä sisäkorvassa ja sitä, miten eri elektrodikontaktien tuottama stimulus vaikuttaa toisten elektrodikontaktien alueella. Tällaisen mittauksen potentiaalisena sovelluskohteena on mm. leikkauksenaikainen elektrodiketjun asennon arviointi ilman kuvantamista.

Kuulohermovaste

Kuulohermovastemittauksessa mitataan aktiopotentiaali, jonka ryhmä kuulohermosäikeitä tuottaa synkronoidusti, kun niiden lähelle tuotetaan sähköinen stimulus (engl. electrically-evoked compound action potential, ECAP). Mittaussarjasta ja -parametreista riippuen voidaan saada erilaista tietoa kuulohermon reagoinnista sisäkorvaistutteen tuottamaan stimulaatioon. Yleisin mittaussarja on kynnyksmittaus (T-ECAP), jossa määritetään pienin sähkövirta, jolla kuulohermo tuottaa vasteen. Tämä kynnyksmittaus voidaan mitata kaikille elektrodikontakteille erikseen. Mittaus voidaan tehdä manuaalisesti tai automaattista mittausalgoritmia käyttäen. Kuulohermovastekynnyksmittaus tehdään tyypillisesti aina leikkauksen yhteydessä. Tällä varmistutaan heti implantin asentamisen jälkeen siitä, että sen tuottama stimulus tuottaa kuulohermossa aktivaation. Tämä on tärkeä tieto niin leikkaustiimille kuin potilaalle ja hänen perheelleenkin. Lisäksi kynnyksmittauksella saadaan objektiivinen estimaatti kunkin elektrodikontaktin sopivalle säätötasolle. Leikkauksen aikana mitatut kuulohermovastekynnykset toimivatkin usein ensimmäisten säätötasojen pohjana – etenkin pienillä lapsilla, joilta ei saa kattavaa subjektiivista palautetta implantin tuottamasta äänestä. Kynnyksmittauksen tulos antaa estimaatin etenkin säätötasojen profiilista (ts. elektrodikontaktien keskinäinen balanssi), mutta sopivan äänikartan aikaansaamiseksi usein profiilin tasoa (ts.

kokonaisäänenvoimakkuus) skaalataan yhdellä elektrodikontaktilla mitatun subjektiivisen kynnystason perusteella (kts. esim. Brown et al. 2000 & Cafarelli Dees et al. 2005).

Tilanteesta ja kliinisestä käytännöstä riippuen kuulohermovastemittauksia voidaan tehdä myös leikkauksen jälkeen, esimerkiksi tarkentamaan leikkauksenaikaisia mittauksia, selvittämään ongelmatilanteita, tai hakemaan vahvistusta muuttuneille säätötasolle. Tällöinkin tyypillisesti mitataan ECAP-kynnys, jota voidaan verrata leikkauksenaikaisiin kynnyksiin. Toisaalta voidaan mitata esimerkiksi ECAP-vasteen amplitudi äänikartassa käytössä olevalla maksimistimulaatiotasolla, joka antaa objektiivisen arvion siitä, miten voimakkaasti kuulohermo reagoi voimakkaimpiin ääniin.

Kynnysmittauksen lisäksi valmistajakohtaiset ECAP-mittausalgoritmit voivat mahdollistaa monenlaisia muita kuulohermovastemittauksia. Näitä ovat esimerkiksi spread of excitation (SOE) -mittaus, joka mittaa stimuluksen leviämistä sisäkorvassa (Cohen et al. 2003). SOE-mittauksen tyypillinen kliininen sovelluskohde on leikkauksenaikainen elektrodiketjun asennon arviointi. SOE-mittauksen haastajaksi tässä sovelluksessa on viime vuosina noussut aiemmin mainittu impedanssitomografia, joka on nopeampi ja robustimpi mittaus, koska se mittaa suoraan stimulaation leviämistä sähköisenä ilmiönä, siinä missä SOE mittaa välillisesti kuulohermon aktivaation kautta.

Stapediusrefleksi

Stapediusrefleksi on kuulojärjestelmän autonominen reaktio voimakkaaseen ääneen, joka aiheuttaa stapediuslihaksen supistumisen. Tätä refleksiä hyödynnetään sisäkorvaistuteleikkauksen aikana ESRT-mittauksessa (electrically-evoked stapedial reflex threshold), jossa istutteella stimuloidaan yhtä elektrodikontaktia ja etsitään kynnystaso, jolla stapediusrefleksi on visuaalisesti nähtävissä. Vasteen rekisteröinti tapahtuu siis subjektiivisesti. Näin saadaan sähköisesti herätetty stapediusrefleksikynnys, joka on kuulohermokynnyksen tapaan leikkauksenaikainen vahvistus siitä, että istute stimuloi kuulojärjestelmää. Lisäksi kynnyksiä voi käyttää sopivien maksimisäätötasojen arvioinnissa. ECAP-vasteeseen verrattuna ESRT-vaste mittaa laajempaa osaa kuulojärjestelmästä, sillä stapediusrefleksi vaatii toimivan yhteyden sisäkorvasta aivorunkoon asti. ESRT-mittauksen voi tehdä myös leikkauksen jälkeen. Tällöin, näköyhteyden välikorvaan puuttuessa, vaste kerätään tympanometrilla.

Elektrokokleografia

Elektrokokleografiassa (ECOG) mitataan sisäkorvan aistinsolujen ja kuulohermon sähköisiä vasteita akustiselle herätteelle. Heräte tuotetaan kuulokkeella ja vaste mitataan mittaalektrodilla, joka voidaan sijoittaa korvakäytävään, tai viedä tärykalvon läpi lähemmäs mittauksen kohdetta. Viime aikoina joihinkin sisäkorvaistutejärjestelmiin on tullut mahdollisuus tehdä ECOG-mittauksia suoraan istutteen omalla elektrodiketjulla. Tämä tuo ECOG-mittauksen helpommin sovellettavaksi kliiniseen käytäntöön, kun erillistä mittauselektrodia ei tarvita.

ECOG-vaste koostuu neljästä komponentista, mutta sisäkorvaistutteen kontekstissa kiinnostus yleensä kohdistuu simpukan mikrofoniin potentiaaleihin (engl. cochlear microphonics, CM). CM-vaste on basillaarikalvon aistinsolujen tuottama ja se heijastaa akustisen herätteen muotoa. Koska CM-vasteen mittaaminen edellyttää toimivia aistinsoluja, vasteesta voidaan arvioida sisäkorvaistutekäyttäjän akustisen jäännöskuulon toimintaa eri taajuuksilla. ECOG-mittauksen sovelluksia ovat siis etenkin objektiivinen äänesaudiometria jäännöskuulon osalta sekä leikkauksenaikainen sisäkorvan toiminnan seuraaminen elektrodiketjun sisäänviennin aikana. Jälkimmäisessä sovelluksessa CM-vasteen amplitudia seurataan reaaliaikaisesti ja amplitudin kehitys antaa arvion jäännöskuulon säilyvyydestä. O’Leary et al. (2020) havaitsi että jäännöskuulon säilyminen 12 kk mittauspisteen kohdalla oli merkittävästi huonompaa niillä potilailla, joiden CM-vasteen amplitudin tippui leikkauksen aikana. Edellä mainittujen sovellusten lisäksi ECOG-mittauksilla on potentiaalisia tutkimusasteella olevia sovelluskohteita sisäkorvaistutekuntoutuksen kontekstissa, kuten elektrodiketjun paikan arviointi tai istutesäätöjen optimointi.

Aivorunko- ja kortikaalivasteet

Edellä kuvattujen lisäksi objektiivisia vasteita sisäkorvaistutteen stimulaatiolle voidaan mitata aivorungosta (Electrically-evoked auditory brainstem response, EABR) tai kortikaaliselta ja subkortikaaliselta tasolta (ei käsitellä tässä luennossa). EABR-mittauksessa stimulus tuotetaan istutteella ja mittaus tehdään päähän sijoitettavilla pinta-elektrodeilla. Mittaus voi olla hyödyllinen esimerkiksi, jos kuulohermovaste vaikuttaa normaalilta, mutta kuntoutustulos on huono, tai jos subjektiivinen vaste on epäselvä. EABR-mittaus kertoo, kulkeeko viesti aivorunkotasolle, ja tämä voi selventää mm., että aiheuttaako subjektiivisen vasteen kuulohavainto vai esimerkiksi kasvohermostimulaatio. EABR-kynnyksiä voidaan tarvittaessa käyttää myös arvioimaan säätötasoja. Lisäksi EABR-mittaus on tärkeä työkalu aivorunkoistutteen asentamisessa ja sen säätötasojen määrittelyssä.

Luennon laajuus ei riitä kaikenkattavaan katsaukseen objektiivisista mittareista. Maininnan tasolle jätetään myös korkeamman tason prosesseja huomioon ottavat mittaukset, kuten kuuntelun kuormittavuuden (engl. listening effort) objektiivinen mittaaminen pupillometriavulla (kts. esim. Naylor et al 2018)

Yhteenveto

Sisäkorvaistutekuntoutuksen tukena on lukusia objektiivisia mittareita ja mittaustapoja, joilla voidaan saada eri näkökulmia kuulojärjestelmän toimintaan sisäkorvaistutteen kannalta ja joilla kullakin on oma roolinsa kokonaisuudessa. Alan tekniikka kehittyy jatkuvasti, ja esimerkiksi viime vuosien aikana on tullut kliinisesti saataville uusia mittaumahdollisuuksia, joiden täyttä potentiaalia ja sovelluskenttää ei vielä täysin tunneta. Rutiinisti tehtävät mittaukset kuten impedanssimittaukset ja kuulohermovastemittaukset ovat oleellinen osa kuntoutuksen seuranta yhdessä subjektiivisten mittareiden kanssa. Monipuolinen mittaripaletti ja valmius myös kehittyneempiin mittauksiin mahdollistaa ongelmanratkaisun ja kuntoutustilanteen seuraamisen objektiivisesti kuntoutujan ja laitteen elämänsä eri vaiheissa.

KIRJALLISUUTTA

Brown C.J., Hughes M.L., Luk B., Abbas P.J., Wolaver A., Gervais J. (2000). The relationship between EAP and EABR thresholds and levels used to program the nucleus 24 speech processor. *Ear Hear*, 21:151-63.

Cafarelli Dees D., Dillier N., Lai, W.K. et al. (2005). Normative findings of electrically evoked compound action potential measurements using the neural response telemetry of the Nucleus CI24M cochlear implant system. *Audiol Neurotol*, 10:105-16

Choi J., Payne M.R., Campbell L.J., Bester C.W., Newbold C., Eastwood H., O'Leary S.J. (2017). Electrode Impedance Fluctuations as a Biomarker for Inner Ear Pathology After Cochlear Implantation. *Otol Neurotol*, 38(10):1433-1439.

Cohen, L.T., Richardson L.M., Saunders, E., Cowan R.S.C. (2003). Spatial spread of neural excitation in cochlear implant recipients: comparison of improved ECAP method and psychophysical forward masking. *Hear Res*, 179:72-87.

Naylor G., Koelewijn T., Zekveld A.A., Kramer, S.E.. (2018) The Application of Pupillometry in Hearing Science to Assess Listening Effort. *Trends Hear*, 22

O'Leary S., Briggs R., Gérard J., Iseli C., Wei B., Tari S., Rousset A., Bester C. (2020). Intraoperative Observational Real-time Electrocochleography as a Predictor of Hearing Loss After Cochlear Implantation: 3 and 12 Month Outcomes. *Otol Neurotol* [published online ahead of print, 2020 Jun 18]

Shaul C., Bester C.W., Weder S., Choi J., Eastwood H., Padmavathi K.V., Collins A., O'Leary S.J. (2019). Electrical Impedance as a Biomarker for Inner Ear Pathology Following Lateral Wall and Peri-modiolar Cochlear Implantation. *Otol Neurotol*, 40(5):e518-e526