

SISÄKORVAISTUTETTA KÄYTTÄVIEN AIKUISTEN TAPAHTUMASIDONNAISET JÄNNITEVASTEET

Eila Lonka, Helsingin yliopisto, Käyttäytymistieteiden laitos, Logopedian osasto

Risto Näätänen, Tarton yliopisto, Psykologian laitos, Viro/ University of Århus, Centre of the Functionally Integrated Neuroscience, Tanska

Kimmo Alho, Helsingin yliopisto, Käyttäytymistieteiden laitos, Kognitiivisen ja neuropsykologian osasto

Sisäkorvaistutteen (SI) ja niissä käytettyjen äänenkäsittelytekniikoiden nopeasta kehityksestä huolimatta aikuisten SI-käyttäjien puheen havaitsemisen ja äänneiden erottelun kyvyssä on tuntuvaa vaihtelua. Äänien synnyttämien tapahtumasidonnaisten jännitevasteiden (ERP; event-related potential) avulla voidaan tutkia kuuloinformaation käsittelyä aivokuorella. Tässä artikkelissa kuvataan aikuisten SI-käyttäjien kuntoutumista kortikaalisten vasteiden, etenkin mismatch negativity (MMN) -vasteen avulla.

Asiasanat: Aikuiset, kuulo, sisäkorvaistute, tapahtumasidonnaiset jännitevasteet, MMN.

JOHDANTO

Sisäkorvaistutteen (SI) äänenkäsittelytekniikat ovat kehittyneet nopeasti viime vuosina (Wilson & Dorman, 2008a; Välimaa & Lonka, 2010). Teknologian kehityksestä huolimatta aikuisten SI-käyttäjien kyvyssä erottaa puhetta ja sen eri piirteitä toisistaan on kuitenkin huomattavaa vaihtelua (Wilson & Dorman, 2008b; Green ym., 2007; Välimaa, 2010). Eroja on selitetty kuurouden kestolla, SI:n saanti-ikällä ja muun muassa sillä, miten

SI-käyttäjä pystyy päättelyn avulla käyttämään hyväkseen kieleen perustuvia tunnistusvihjeitä (katsaus aiheeseen esim. Wilson & Dorman, 2008a). Yksilöllisten, kuuroutta aiheuttavien fysiologisten tekijöiden on myös arveltu selittävän puheen havaitsemistaitojen palautumisen eroja; esimerkiksi, miten kuulojärjestelmä sisäkorvasta aivojen kuuloalueille on säilynyt, tai miten sen yhteistoiminta SI:n elektrodien kanssa kehittyy (Kawano, Sheldon, Clark, Ramsden, & Raine, 1998; Liang, Lusted, & White, 1999; Teoh, Pisoni & Miyamoto, 2004). Fysiologisten tekijöiden yhteydestä puheen havaitsemiseen ei kuitenkaan ole saatu yhdenmukaisia tuloksia. Näyttää siltä, että aikuisten puheen havaitsemista eniten selittävä tekijä on kuurouden kesto (esim. Green ym., 2007).

Kirjoittajien yhteystiedot:

Eila Lonka

Käyttäytymistieteiden laitos

PL 9, 00014 HELSINGIN YLIOPISTO

Sähköposti: eila.lonka@helsinki.fi

Monet aikuiset SI-käyttäjät saavuttivat ensimmäisten laitetyyppien (perusäänien ja formanttien piirteitä poimiva F0/F1/F2 -strategia; Sheppard 1995) avulla vain taidon erottaa puheen suprasegmentaalisia piirteitä, kuten tavu- ja sanarajoja sekä puheen rytmisiä ominaisuuksia. He olivat siitä syystä riippuvaisia puheen visuaalisista tunnistusvihjeistä. Myöhemmin, 2000-luvulla, kehittyneet strategiat (esim. CIS, continuous interleaved sampling; Wilson & Dorman, 2008a) perustuvat SI:n kanavien nopeaan näytteenottotaajuuteen. Nykyisten laitteiden avulla SI:n käyttäjät tunnistavat ääniteitä, sanoja ja lauseita sekä hiljaisissa että parhaimmillaan hälyisissä kuunteluolosuhteissa (Kronlund, 2005; Wilson & Dorman, 2008b). Kaikkein uusimmat SI:t ovat luoneet lisää edellytyksiä yhä parempaan puheenerottamiseen (katsaus aiheeseen Wilson & Dorman, 2008a). Eräs teknologian nykyisistä haasteista on luoda sellaisia äänenkäsittelystrategioita, joilla voidaan havaita puhetta vaikeissa kuunteluolosuhteissa ja kuunnella musiikkia siitä nauttien.

SI-KÄYTTÄJIEN KESKUSHERMOSTON TUTKIMUSMENETELMÄT

SI-käyttäjien kuulon kuntoutumista ja siihen liittyvää kuulojärjestelmän muotoutumista on tutkittu mm. positroniemissiotomografia- (PET-) menetelmällä, jolla voidaan kuvantaa aivotoimintaan liittyviä paikallisia verenkierron ja aineenvaihdunnan muutoksia (esim. Green, Ramsden, Julyan & Hastings, 2008a). On esimerkiksi havaittu, että puhetesteistä parhaiten suoriutuvilla SI-käyttäjillä kuuloaivokuoren aktivaatio on voimakkaampaa kuin puheteesteissä heikommin suoriutuvilla SI-käyttäjillä. PET-menetelmää on käytetty myös kuurosokeiden SI-käyttäjien neuraalisen muotoutuvuuden tutkimukseen (Green, Ramsden, Julyan & Hastings, 2008b).

Greenin ryhmä havaitsi tutkittavilla aktiviteetia sekä auditiivisella että visuaalisella aivokuorella SI:n käyttöönotton jälkeen. Valitettavasti PET-menetelmää ajallisesti ja anatomisesti tarkemmalla aivojen toiminnallisella magneettikuvauksella (functional magnetic resonance imaging, fMRI) ei useimmiten voida tutkia SI-käyttäjien aivotoimintaa, koska SI-laitteissa on osia (erityisesti sen sisäinen magneetti), joita ei voi turvallisesti viedä MRI-laitteen voimakkaaseen magneettikenttään (Cullington & Battmer, 2004, ks. myös Crane, Gottschalk, Kraut, Aygun & Niparko, 2010).

Sisäkorvaistutteen käyttäjien kuulon kuntoutumista on ehkä eniten tutkittu EEG-rekisteröinnin avulla mitatuilla herätevasteilla. Tässä artikkelissa onkin keskitytty erityisesti EEG:llä mitattuihin aivokuorella syntyviin vasteisiin.

SI-KÄYTTÄJIEN AIVOJEN JÄNNITEVASTEET

EEG:n avulla mitatut aivojen jännitevasteet voidaan luokitella esimerkiksi niiden viiveen (ärsykkeen esittämisestä vasteen huipun esiintymiseen) perusteella kolmeen eri ryhmään; aivorunkovasteet, joilla on lyhyt viive (latenssi 1–10 ms), keskilatenssin vasteet (10–50 ms) ja myöhäiset vasteet (yli 50 ms) (esimerkiksi Lang, Häkkinen, Larsen, Partanen & Tolonen, 1994).

Aivojen sähköistä toimintaa rekisteröivällä EEG-menetelmällä mitatut aivorunkovasteet, jotka syntyvät alle 10 ms:n kuluessa äänen alusta, ilmentävät kuuloradan toimintaa kuulohieron, simpukan tumakkeen, ylemmän oliivitumakkeen, ulkovemmelradan ja alemman nelikukkulan alueilla (Wang, Zhang, Wang, Dong & Zeng, 2009). Näiden amplitudiltaan pienten vasteiden esiin saaminen edellyttää ääntä seuraavan EEG:n keskiarvoistamista esim. tuhannen äänen esittämiskerran yli.

Tässä artikkelissa keskitytään myöhäisempiin aivokuorella syntyviin jännitevasteisiin. Nämä tapahtumasidonnaiset jännitevasteet (event-related potential, ERP) saadaan esiin toistamalla ääntä kymmeniä tai satoja kertoja. Ne koostuvat useista komponenteista, jotka voidaan luokitella viiveensä, polariteettinsa ja lokalisaationsa mukaan (esim. Crowley & Colrain, 2004). Aikuisten SI:n käyttäjien aivosähkökäyrässä eli EEG:ssä esiintyviä tapahtumasidonnaisia jännitevasteita on toistaiseksi tutkittu suhteellisen vähän. Lähes kaikki tutkimusraportit ovat tyypiltään poikkileikkaustutkimuksia, seurantutkimuksia on löydettävissä toistaiseksi vain yksi (Lonka ym., 2004). Sen sijaan SI:n saaneiden lasten vastaavia tutkimuksia, myös seurantutkimuksia, on selvästi enemmän (katsaus Johnson, 2009). Aikuisten SI-käyttäjien kortikaalisista vasteista on useimmin tutkittu poikkeavuusnegatiivisuusvastetta (MMN; mismatch negativity, Näätänen, Gaillard & Mäntysalo, 1978; Näätänen, Paavilainen, Rinne & Alho, 2007) mutta myös P1-, N1-, P2- tai P3-vasteita (Johnson, 2009). Esitelmme aluksi näiden vasteiden yleispiirteitä.

P1-, N1- ja P2-vasteet

Noin 100 millisekuntia (ms) ärsykkeen alkamisesta esiintyy ensimmäinen suuri, pääläellä polariteetiltaan negatiivinen jännitevaste, nk. N1-vaste. Sitä edeltää positiivinen P1-vaste ja sitä seuraa P2-vaste. Kuuloaivokuorelle paikantuvan P1-vasteen viiveen on huomattu liittyvän mm. lapsen kehitykseen aivokuoren kuuloalueiden kypsyessä (Bauer, Sharma, Martin & Dorman, 2006).

N1-vaste ”virittää” kuulojärjestelmän eli se on yhteydessä vireystilan muutokseen ja kuullun huomioimiseen (Näätänen, Kujala & Winkler, 2010). N1-vasteen suuruus riippuu ääniärsykkeiden ajallisesta etäisyydestä toisistaan (Crowley & Colrain, 2004). Sen on arveltu paikantuvan primaarin kuuloaivokuoren

läheisyyteen (Hyde, 1997). N1-P2-kompleksi heijastaa minkä tahansa auditiivisen eron havaitsemista (korkeus, voimakkuus, äänilähteen paikantaminen, jne.). Sen käsitetään olevan yhteydessä subjektiiviseen kuulokynnykseen (mikä on tärkeätä silloin, jos sitä ei behavioraalaisesti pystytä mittaamaan; Lightfoot & Kennedy, 2006). Se saadaan aikaan ei-foneettisilla napsahdusäänillä ja puheärsykkeillä. Vasteen arvellaan heijastavan tietoista äänteen havaitsemista mutta myös huomion suuntaamista. SI:n käyttäjiltä on rekisteröity N1- ja P2-aaltojen muodostamaa kompleksia (esim. Roman, Canévet, Marquis, Triglia, & Liégeois-Chauvel, 2005). Näiden vasteiden viiveiden ja amplitudien on havaittu olevan jokseenkin samankaltaisia kuin normaalisti kuulevienkin aikuisten.

Poikkeavuusnegatiivisuus (MMN) ja P3-vasteet

MMN on kognitiivinen, tapahtumasidonnainen jännitevaste (Näätänen & Alho, 1997), joka syntyy vasteena poikkeamaan jossakin äänympäristössämme toistuneessa säännönmukaisuudessa (nk. oddball-paradigma), esimerkiksi vakioärsykkeen sijasta satunnaisesti esiintyvään korkeudeltaan, voimakkuudeltaan, kestoltaan tai tulosuunnaltaan poikkeavaan ääneen (Näätänen, Paavilainen, Rinne & Alho, 2007). MMN saavuttaa huippunsa 100–200 ms poikkeavan äänen esittämisestä. MMN:n oletetaan perustuvan sensoriseen muistijälkeen, mutta liittyvän myös tarkkavaisuuden tahattoman suuntaamisen käynnistämiseen. Jotta MMN-vaste syntyisi, toistuvan vakioärsykkeen synnyttämän tai pitkäkestoisuudesta herättämän muistijäljen on oltava aktivoituneena, jolloin kuuloaivokuorella voidaan verrata poikkeavan äänen piirteitä toistuneen vakioärsykkeen piirteisiin. MMN-vaste syntyy passiivisessa kuuntelutilanteessa, jossa tutkittavan tarkkavaisuus pyritään pitä-

mään poissa äänistä lukemis- videonkatselu- tai jonkin vaativamman tehtävän avulla.

MMN-vaste on suurimmillaan päänpinnan etuosissa ja se syntyy pääosin ohimolohkon (temporaalilohkon) yläpinnalla sijaitsevalla kuu- loaivokuorella ja osin otsalohkoissa (Näätänen, Paavilainen, Rinne & Alho, 2007). MMN-vas- tetta edeltää usein osittain sen kanssa päällekkäi- nen N1-vaste, ja sitä voi seurata myös P3a-vaste tai N2b-P3a -kompleksi, jos tutkittava suuntaa huomionsa ärsykkeisiin tai huomioi niiden mer- kityksen (esim. Escera, Alho, Winkler & Näätä- nen, 1998; Boksem, Meijman & Lorist, 2005). P3a-vaste syntyy toistuvien ärsykkeiden joukos- sa esiintyviin huomiota herättäviin ärsykkeisiin ja sen arvellaan heijastavan tarkkaavaisuuden ta- hatonta kääntymistä (Alho, Salmi, Degerman & Rinne, 2006). Se erottuu lyhyemmän viiveensä ja frontaalisemman paikantumisen vuoksi P3- ja P3b-vasteista.

P300-vaste (tai P3- tai P3b-vaste) on erilaisissa tehtävissä kohdeärsykkeisiin syntyvä jännitevas- te, jonka huippu esiintyy varhaisimmillaan noin 300 ms kohdeärsykkeen alkamisesta (Duncan ym., 2009), joskin P3 voi saavuttaa huippunsa paljon myöhemminkin koetilanteesta riippuen. P3 syntyy esimerkiksi vasteena oddball -paradig- massa esiintyviin harvinaisiin kohdeääniin, kun tutkittavan tehtävä on aktiivisesti tunnistaa ne nappia painamalla tai laskea niitä mielessään. Vasteen viive riippuu ärsykkeiden luokittelun monimutkaisuudesta; monimutkaiset ärsyke- keet ovat vaikeammin luokiteltavissa vakioisiin ja poikkeaviin, mikä on usein nähtävissä myös P3-vasteen viiveessä ja amplitudissa.

Ärsykkeiden esittämistavat ja tutkimuksen valmistelu

Koska monissa SI-käyttäjiiä koskevissa tutki- muksissa on havainnoitu useampia vasteita samalla tutkimuskerralla, esittelemme tämän jälkeen tutkimusten tuloksia myös ärsyke- tyyppien mukaan.

SI-käyttäjien tapahtumasidonnaisia jänni- tevasteita voidaan tutkia esittämällä ärsykkeet kahdella eri tavalla:

- 1) Ärsykkeet esitetään tietokoneen (SI:n ohjelmointilaitteisto) avulla suoraan istutteen elektrodeille, jolloin niille lähetetään hyvin lyhyitä, pulssimaisia sähköisiä ärsykejä (esim. Wable, van den Abbeele, Gallégo & Frachet, 2000).
- 2) Ääniärsykkeet esitetään akustisesti vapaassa kentässä, mikä paremmin vastaa sitä, miten ääniä normaalissakin tilanteessa kuullaan (Ponton & Don, 2004).

”Yksinkertaiset” siniaaltomuotoiset ärsyke- keet voidaan esittää tutkittavalle sekä SI:n ohjelmointilaitteistoa käyttäen että vapaas- sa kentässä. Sen sijaan monimutkaisemmat ärsykkeet (esim. soinnut, äänneet, tavut) esi- tetään vapaassa kentässä tutkittavan itse va- litsemalla sopivan miellyttävällä kuunteluvoi- makuudella. SI sähköisenä laitteena voi aihe- uttaa häiriöitä EEG-rekisteröintiin (Ponton & Don, 2004). Tämä on huomioitava, kun tutkittavan pään pinnalle asetetaan rekiste- röiviä elektrodeja. Niiden kontaktin on oltava hyvä ja ne on valittava niin, ettei laite itsessään lisää häiriöiden mahdollisuutta. Tästä syystä useissa tutkimuksissa elektrodien määrää on vähennetty, tai analyysiin valittujen elektro- dien määrää on rajattu silloinkin, kun niitä on kiinnitetty laajemmin koko päänpinnalle.

Vasteet äänen taajuuden muutoksiin

SI-käyttäjien jännitevasteita on tutkittu ää- nillä, jotka ovat 0,5–2 oktaavin tai sitä suu- remmalla etäisyydellä toisistaan. Tällä tavoin on välttytty siltä, että ärsykeparin aiheuttamat stimulaatiot istutteen elektrodeilla leviäisivät sisäkorvassa samalle alueelle. Aivan ensim- mäiset vastetutkimukset suorittivat Oviatt ja Kileny (1991). He havaitsivat, että normaalis-

ti kuulevien ja SI-käyttäjien P3-vasteet olivat samanlaisia suurelle taajuuserolle toistuvan vakioäänen ja poikkeavan kohdeäänän välillä (vakioääni 500 Hz, kohdeääni 3000 Hz). Tätä pienemmille taajuuseroille (500/1000 Hz ja 500/2000 Hz) SI-käyttäjien P3-vasteen viive oli pidempi kuin normaalisti kuulevien. Tutkijat esittivät tämän johtuvan siitä, että SI-käyttäjillä oli vaikeuksia erottaa ärsykkeiden välisiä pieniä eroja. Tutkittavat henkilöt olivat käyttäneet SI:a vasta 6–24 kuukautta, eivätkä ehkä näin olleet laitteen antamaan kuuloinformaatioon vielä tottuneita. Toisessa tutkimuksessa SI-käyttäjien MMN-vasteiden viiveet vastasivat normaalisti kuulevien vasteita (Roman, Canévet, Marquis, Triglia, & Liégeois-Chauvel, 2005). Kuitenkin tarkemmassa analyysissä MMN-vasteiden muoto ja kesto erosivat kuulevien verrokkien vasteista. Kahta poikkeusta lukuun ottamatta SI-käyttäjien MMN oli kaksihuippuinen. Lisäksi todettiin, että myös SI-käyttäjillä vakioärsykkeen ja poikkeavan ärsykkeen pienemmän eron (1000/1500Hz) synnyttämä MMN:n viive oli pidempi kuin suuremman eron 1000/2000 Hz synnyttämä MMN:n viive.

On myös osoitettu, että SI:sta vähän hyötyvien käyttäjien MMN-vasteet taajuusmuutoksiin ovat pienempiä ja myöhäisempiä kuin SI:sta hyötyvien ja normaalikuuloisten henkilöiden vasteet. Kellyn ryhmä (Kelly, Purdy & Thorne, 2005), joka käytti 1000 Hz:n vakioääntä ja 1250 Hz:n ja 1500 Hz:n poikkeavia ääniä, havaitsi, että verrattuna normaalisti kuuleviin (n=12), joidenkin SI-käyttäjien (n= 12) MMN-vasteen amplitudi oli pieni tai olematon ja viive ärsykkeen alkamisesta pitkä. Jos SI-käyttäjä ei saa laitteestaan suurta hyötyä puheen piirteiden kuulemisessa, on mahdollista, että kuuloaivokuoren taajuusinformaation käsittely ei järjestäydy uudelleen yhtä tehokkaasti kuin laitteestaan hyötyvillä. Heikompiin tuloksiin on usein yhteydessä edeltäneen kuurouden kesto, mikä vaikuttaa

puheenerotuskyvyn kehittymiseen ja vaimentaa myös aivokuorella syntyviä vasteita.

Edellisistä tutkimuksista poiketen Nager ryhmineen (Nager ym., 2007) vertasi normaalisti kuulevien ja SI-käyttäjien jännitevasteita aktiivisen (N2b- ja P3b-vasteet) ja passiivisen kuuntelun (MMN- ja P3a-vasteet) tilanteissa. Tutkimuksessa käytettiin taajuusärsykeitä (vakioääni 1000 Hz, 4 poikkeavaa ärsykettä välillä 700–2900 Hz). Aktiivisen kuuntelun napinpainallustehtävässä syntyneet SI-käyttäjien jännitevasteet eivät eronneet kuulevien vasteista, mutta passiivisen kuuntelun tilanteessa P3a-vaste ja MMN-vaste oli verrokkieihin nähden pienempi. Tutkijat päättelivät tästä, että SI-käyttäjät eivät välttämättä huomaa ympärillään esiintyviä ääniä ilman aktiivista tarkkavaisuuden suuntaamista.

MMN- ja P3-vasteet äännemuutoksiin

Muutamissa SI-käyttäjien MMN-tutkimuksissa (esim. Groenen, Snik & van den Broek, 1996; Kraus ym., 1993) on käytetty konsonantti-vokaali -tavupareja, jotka eroavat toisistaan soinnillisuuden (esim. /da/ ja /ta/), artikulaatiopaikan ja -tavan (esim. /ma/ ja /pa/), tai vokaalien formanttiominaisuuksien suhteen (esim. /e/ ja /o/). Tutkittavien määrä on tavallisesti ollut alle 10, ja SI:n käyttö on vaihdellut muutamasta kuukaudesta useaan vuoteen. Verrokkeina on käytetty normaalisti kuulevia henkilöitä. Krausin ryhmä (Kraus ym., 1993; n=8, tutkittavat 34–81 v.) havaitsi normaalisti kuulevien ja SI:sta selvästi hyötyvien käyttäjien MMN-vasteiden (Fz) samankaltaisuuden, kun taas vähän hyötyä saaneiden SI-käyttäjien MMN-vaste syntyi ainoastaan vasteena huomattavan suurille ärsyke-eroille tai ei lainkaan. Myös Groenenin ryhmän (Groenen, Snik & van den Broek, 1996) tutkimuksessa (n=7) hyvin SI:tä hyötyville tutkittaville muodostui selkeä MMN-vaste (Fz) /ba-da/ -erolle samoin kuin

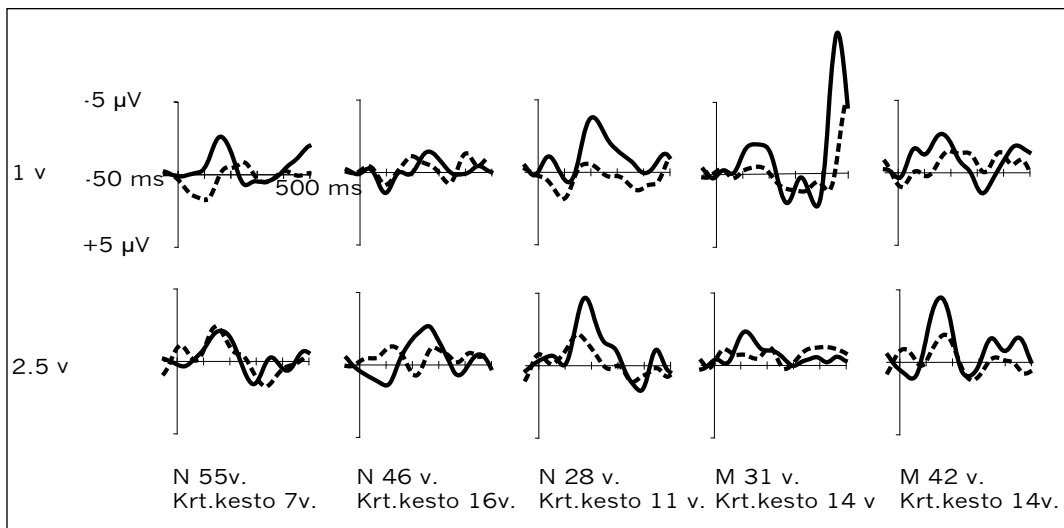
normaalisti kuuleville verrokeille ($n=10$), kun vähemmän laitteestaan hyötyville samanlaista vastetta ei syntynyt. Ryhmät oli jaoteltu ennen mittauksia behavioraalisten puheen havaitsemisen testitulosten perusteella.

Miccon tutkijaryhmä (Micco ym., 1995) käytti /da/, /di/ tavuja rekisteröidessään 10 sisäkorvaistutetta käyttävän aikuisen P3 -vasteita. P3 -vasteet havaittiin samankaltaisiksi kuin normaalisti kuulevien lukuun ottamatta heikoimmin puhetta kuulevan henkilön P3 -vastetta, jota ei syntynyt ollenkaan. Silti tämä henkilö pystyi erottamaan esitetyt ärsykkeet behavioraalisesti.

Salo, Peltola, Aaltonen, Johansson Lang ja Laurikainen (2002) tutkivat neljän sisäkorvaistutetta käyttävän aikuisen (ikä 29–55 v.) puheen piirteiden havaitsemista MMN:n avulla. Vakioärsyksenä käytettiin vokaalia /i/ ja poikkeamina vokaaleja, joiden F2-jatkumo vaihteli (2313, 2400, 2488, 2578 Hz). Merkitsevä MMN-vaste (Fz) havaittiin, kun vakioärsyksen ja poikkeaman F2 -ero oli suu-

rin. Myös vokaalien tuottamista tutkittiin ja niiden kontrastien ääntämisessä havaittiin lievää liioittelua.

Omassa tutkimuksessamme (Lonka ym., 2004) käytimme vokaaleja MMN-vasteen synnyttämiseksi. Kyseessä oli viiden aikuisen SI-käyttäjän 2,5 vuoden seurantatutkimus. Luotettava MMN-vaste nähtiin pääsääntöisesti vasta vuoden kuluttua SI-aktivoinnista. Tutkimuksessa käytettiin pienempiä (/e/ ja /ø/) ja suurempia (/e/ ja /o/) vokaalien formanttien eroja. MMN kehittyi tutkittavilla siten, että suuremman vokaalieron (/e/ ja /o/) synnyttämä MMN (Fz) oli pienemmän eron synnyttämää suurempi sekä yksi vuosi että 2,5 vuotta SI:n aktivoinnin jälkeen (kuva 1). Kun verrattiin MMN-vastetta yksi vuosi ja 2,5 vuotta SI-aktivoinnin jälkeen, MMN:n amplitudi kasvoi ja viive lyheni merkittävästi ajan myötä pienemmälle vokaalierolle (/e/ ja /ø/). Puheen erotuskyvyn havaittiin tässäkin tutkimuksessa kehittyvän eniten niillä tutkittavilla, joiden MMN-amplitudit kasvoivat eniten.



Kuva 1. Viiden sisäkorvaistutetta käyttävän aikuisen (ryhmän keskiarvot) MMN-vasteiden amplitudien ja latenssien kehitys 2,5 vuoden seurannassa. Kuvassa vähennyskäyrät eroille: /e/, /o/ — ja /e/, /ø/..... (kuvan julkaisulupa Karger Publishers).

POHDINTA

Tutkimusten päätulos on, että SI-käyttäjien kuuloaivokuorella syntyvät vasteet muoutuvat istutteen käytön myötä samankaltaisiksi kuin normaalisti kuulevienkin henkilöiden. Tämä tulos kuvastaa kuuloaivokuoren muokautuvuutta ja sitä, että kuuntelutaidot ovat harjaannutettavissa. Poikkeuksen tavanomaisista tuloksista tekevät pitkään ilman kuuloa olleet henkilöt, jolle SI-laitteen antama hyöty voi jäädä vähäisemmäksi. Tällöin myös MMN tai muut jännitevasteet ovat vaikeita. Tämä voisi johtua juuri siitä, että kyseiset tutkittavat ovat olleet pitkään ilman kuuloaistimuksia, jolloin kuulojärjestelmän eri tasoilla on voinut tapahtua aistideprivaatiosta johtuvia hermosolumuutoksia. Nämä saattavat selittää sitä, että SI:n avulla tapahtuva kuntoutuminen on hitaampaa mitä kauemmin kuurous on kestänyt. Giraud työtovereinen (Giraud, Price, Graham & Frackowiak, 2001) on esittänyt, että kuulodeprivaation vuoksi sisäkorvan solut ja spiraaligangliot voivat tuhoutua. Deprivaatio vaikuttaa myös kuuloratoihin johtaen dendriittien vähenemiseen kuuloradan hermosoluissa. Tällöin muiden aistien kautta vastaanotettu informaatio voi vallata tilaa kuuloaivokuorelta. Edelliseen perustuen olisi tärkeää tutkia pitkään kuuroina olleiden aikuisten vasteet ainakin kahtena ajankohtana riittävän kaukana SI:n aktivoinnista luotettavuuden parantamiseksi. Wilson ja Dorman (2008a) esittävät katsauksessaan, että puheen ymmärtämisen palautumista tapahtuu toki SI:n ensimmäisen käyttövuoden aikana, mutta vielä selkeästi sen jälkeenkin heijastaen tutkittavien aivojen kuuloalueiden vähittäistä uudelleen organisoitumista (ks. myös Dorman, Loizou, Fitzke & Tu, 1993; Dowell, 1995).

Aikuisten SI-käyttäjien jännitevasteiden kehittymisestä ei seurantar tutkimuksia ole juurikaan julkaistu (paitsi Lonka ym., 2004). Seur-

rantatutkimusta ajatellen Tervaniemi ja hänen työtoverinsa (Tervaniemi ym., 1999) ovat osoittaneet, että MMN-menetelmällä on korkea toistettavuus, ja menetelmä antaa samoilla yksilöillä hyvin samanlaiset tulokset tutkimuskerrasta toiseen. Näin menetelmää voitaisiin mahdollisesti käyttää kuulon toimintojen kehittymisen seurannassa yksilötasollakin. SI:tä käyttävien pienten lasten kuulojärjestelmän kehittymistä on jännitevasteilla tutkinut Ponton ryhmineen (Ponton, Don, Eggermont, Waring, Kwong & Masuda, 1996; Ponton, Moore & Eggermont, 1999). Näissä tutkimuksissa on havaittu kehitysviivettä P1-vasteen iän myötä tapahtuvassa viiveen lyhenemisessä, mikä on suhteessa kuurouden kestoon ennen SI:n aktivoitua.

Jännitevasteiden käyttö SI-potilaiden kuulohavaintojen kehittymisen seurantaan on yhä ongelmallista, eikä vähäisin ongelmista ole häiriöiden esiintyminen SI:n aktivoinnin jälkeen (Ponton & Don, 2004). Häiriöihin voidaan vaikuttaa ärsykkeiden kestoa lyhentämällä ja rekisteröivien elektrodien sijoittelulla ja kiinnittämistavalla. Ärsykkeiden laatu vaikuttaa myös jännitevasteisiin esiintyviin häiriöihin. Taajuusmuutoksen käyttö MMN:n ja muiden jännitevasteiden synnyttämiseksi voi olla ongelmallista, koska SI:n käyttäjät saattavat kokea äänen taajuuteen liittyvän korkeuden (pitch) eri tavalla kuin normaalisti kuulevat tai akustisella kuulokojeella kuuntelevat (Gfeller, Turner, Oleson, Zang, Gantz, Forman & Olszewski, 2007). Eriäinen kokemus voi johtua muun muassa SI:n elektrodinahan sijainnista ja pituudesta sekä tyyppikohtaisesta ohjelmoinnista (myös Baumann & Nobbe, 2006). SI:n aiheuttama sähköinen ärsytys voi myös levitä suoraan spiraaliganglioihin simpukan akselissa, ja arvellaan, että siinä tapauksessa äänen taajuuden/korkeuden subjektiivinen havainto voisi olla matalampi kuin normaalisti (Boëx, Cosendai, Sigris, Kós & Pelizzone, 2006). Ohjelmoinnista riippuen

stimuloiva ärsyke voi levittäytyä myös ympäröiviin elektrodeihin elektrodinauhassa, jolloin vakioärsyksen etäisyydellä poikkeaviin ärsykkeisiin on merkitystä. Edellä kuvatuista systistä normaalikuuloisten henkilöiden käyttö vertailuaineistona on hiukan ongelmallista vaikka se antaa odotusarvon, millaisia jännitevasteet normaalisti käytetyn kaltaisille ärsykeille ovat.

MMN-vasteen käytön puolesta puhuu sen riippumattomuus tutkittavan vastauskyvystä, jolloin menetelmää voidaan soveltaa myös pienten lasten auditiivisten prosessien tutkimukseen. MMN-menetelmän avulla voidaan mahdollisesti saada tietoa siitä, miten SI: ta käyttävien lasten kuuloaistimukset ja hermoston muotoutuvuus kehittyvät. Menetelmällä voidaan myös selvittää, miksi SI-lasten puhutun kielen kehityksessä on paljon vaihtelua. Jännitevasteet saattavat antaa SI-lasten kuuloaistimusten kehittämisestä objektiivista tietoa, kun lapset eivät vielä itse osaa tunnistaa ja arvioida kuulemiensa ärsykkeiden eroja (ks. myös Roman, Canévet, Marquis, Triglia & Liégeois-Chauvel, 2005; katsaus aiheeseen Johnson, 2009). Uusin tutkimuksen kohde on SI-käyttäjien musiikin havaitseminen (McDermott, 2004). Tulevaisuuden tutkimushaasteena on seurata SI-lasten musiikin harrastamisen tuloksellisuutta ja musiikin taitojen kehittymistä jännitevastein.

LÄHTEET

- Alho, K., Salmi, J., Degerman, A., & Rinne, T. (2006). Tarkkaavaisuus ja aivotoiminta. Teoksessa H. Hämäläinen, M. Laine, O. Aaltonen & A. Revonsuo (toim.) *Mieli ja aivot. Kognitiivisen neurotieteen oppikirja* (s. 242–251). Turun yliopisto: Kognitiivisen neurotieteen tutkimuskeskus.
- Baumann, U. & Nobbe, A. (2006). The cochlear implant electrode–pitch function. *Hearing Research*, 213, 34–42. doi: 10.1016/j.heares.2005.12.010
- Bauer, P.W., Sharma, A., Martin, K., & Dorman, M. (2006). Central auditory development in children with bilateral cochlear implants. *Archives Otolaryngology, Head and Neck Surgery*, 132, 1133–1136.
- Boëx, C., Cosendai, G., Sigrist, A. Kós, M.-I., & Pelizzone, M. (2006). Acoustic to electric pitch comparisons in cochlear implant subjects with residual hearing. *Journal of the Association for Research in Otorhinolaryngology*, 7, 110–124. doi: 10.1007/s10162-005-00027-2
- Boksem, M.A.S., Meijman, T.F., & Lorist, M.-M. (2005). Effects of mental fatigue on attention: An ERP study. *Cognitive Brain Research*, 25, 107–116. doi:10.1016/j.biopsycho.2005.08.007
- Crane, B.T., Gottschalk, B., Kraut, M. Aygun, N. & Niparko, J.K. (2010). Magnetic resonance imaging at 1,5 T after cochlear implantation. *Otology & Neurotology*, 31, 1215–1220.
- Crowley, K.E. & Colrain, I.M. (2004). A review of the evidence for P2 being an independent component process: age, sleep and modality. *Clinical Neurophysiology*, 115, 732–744. doi: 10.1016/j.clinph.2003.11.021
- Cullington, H.E. & Battmer, R.-D. (2004). Introduction to cochlear implant objective measures. Teoksessa H.E. Cullington (toim.) *Cochlear implants. Objective measures* (s. 1–22). Lontoo: WHURR.,
- Dorman, M.F., Loizou, P.C., Fitzke, J. & Tu, Z. (1995). The recognition of sentences in noise by normal-hearing listeners using simulations of cochlear implants signal processors with 6–20 channels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104, 3583–3585.
- Dowell, R.C. (1995). Speech perception for adults using cochlear implants. Teoksessa G. Plant, K.-E. Spens (toim.) *Profound Deafness and Speech Communication*. Lontoo: WHURR, 262–284.
- Duncan, C.C., Barry, R.J., Connolly, J.F., Fischer, G., Michie, P.T., Näätänen, R.,...Van Petten, C. (2009). Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400. *Clinical Neurophysiology*, 120, 1883–1908. doi: 10.1016/j.clinph.2009.07.045
- Escera, C., Alho, K., Winkler, I. & Näätänen, R. (1998). Neural mechanisms of involuntary at-

- attention to acoustic novelty and change. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10, 590–604.
- Gfeller, K., Turner, C., Oleson, J., Zang, X., Gantz, B., Froman, R. & Olszewski, C. (2007). Accuracy of cochlear implant recipients pitch perception, melody recognition, and speech perception in noise. *Ear and Hearing*, 28, 412–423. doi: 10.1097/AUD.0b013e3180479318
- Giraud, A.-L., Price, C.J., Graham, J.M. & Frackowiak, R.S.J. (2001). Functional plasticity of language-related brain areas after cochlear implantation. *Brain*, 124, 1307–1316.
- Green, K.M.J., Bhatt, Y.M., Mawman, D.J., O'Driscoll, M.P., Saeed, S.R., Ramsden, R.T. & Green, M.W. (2007). Predictors of audiological outcome following cochlear implantation in adults. *Cochlear Implants International*, 8, 1–11. doi: 10.10002/cii.326
- Green, K.M.J., Ramsden, R.T., Julyan, P.J. & Hastings, D. (2008a). Cortical plasticity in the first year after cochlear implantation. *Cochlear Implants International: An Interdisciplinary Journal*, 9, 103–117. doi: 10.1002/cii.358
- Green, K.M.J., Ramsden, R.T., Julyan, P.J. & Hastings, D. (2008b). Neural plasticity in blind cochlear implant users. *Cochlear Implants International: An Interdisciplinary Journal*, 9, 177–185. doi: 10.1002/cii.369
- Groenen, P., Snik, A. & van den Broek, P. (1996). On the clinical relevance of mismatch negativity: results from subjects with normal hearing and cochlear implant users. *Audiology & Neuro-Otology*, 1, 112–124.
- Hyde, M. (1997). The N1 response and its applications. *Audiology & Neuro-Otology*, 2, 281–307.
- Johnson, J.M. (2009). Late auditory event-related potentials in children with cochlear implants. A review. *Developmental Neurophysiology*, 34, 701–720. doi: 10.1080/87565640903265152
- Kawano, A., Sheldon, H.L., Clark, G.M., Ramsden, R.T., & Raine, C.H. (1998). Intracochlear factors contributing to psychophysical percepts following cochlear implantation. *Acta Otolaryngologica*, 118, 313–326.
- Kelly, A.S., Purdy, S.C. & Thorne, P.R. (2005). Electrophysiological and speech perception measures of auditory processing in experienced adult cochlear implant users. *Clinical Neurophysiology*, 116, 1235–1246. doi: 10.1016/j.clinph.2005.02.011
- Kraus, N., Micco, A.G., Koch, D.B., McGee, T., Carrell, T., Sharma, A.,...Weingarten, C.Z. (1993). The mismatch negativity cortical evoked potential elicited by speech in cochlear implant users. *Hearing Research*, 65, 118–124.
- Kronlund, L. (2005). Tekninen kuulonhuolto. Teoksessa E. Lonka & A-M Korpijaakko-Huuhka (toim.) *Kuulon ja kielen kuntoutus* (s. 325–352). Helsinki: Yliopistopaino.
- Lang, H., Häkkinen, V., Larsen, A., Partanen, J. & Tolonen, U. (toim.) (1994) *Sähköiset aivomme*. Helsinki: Suomen kliinisen neurofysiologian yhdistys.
- Liang, D.H., Lusted, H.S. & White, R.L. (1999). The nerve-electrode interface of the cochlear implant: current spread. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 46, 35–43.
- Lightfoot, G. & Kennedy, V. (2006). Cortical electric response audiometry hearing threshold estimation: Accuracy, speed, and the effects of stimulus presentation features. *Ear & Hearing*, 27, 443–456.
- Lonka, E., Kujala, T., Lehtokoski, A., Johansson, R., Rimmanen, S., Alho, K. & Näätänen, R. (2004). The mismatch negativity (MMN) brain response as an index of speech perception recovery in cochlear-implant recipients. *Audiology & Neuro-Otology*, 9, 160–162. doi: 10.1159/000077265
- Mason, S. (2004). The electrically evoked auditory brain stem response. Teoksessa H.E. Cullington (toim.) *Cochlear implants. Objective measures* (s. 130–159). Lontoo: WHURR.
- McDermott, H.J. (2004). Music Perception with Cochlear Implants: A Review. *Trends In Amplification*, 8, 49–82. doi: 10.1177/108471380400800203
- Micco, A.G., Kraus, N., Koch, D.B., McGee, T.J., Carrell, T.D., Sharma, A.,... Wiet, R.J. (1995). Speech-evoked cognitive P300 potentials in cochlear implant recipients. *American Journal of Otology*, 16, 514–20.
- Nager, W., Munte, T.F., Bohrer, I., Lenarz, T., Dengler, R., Möbes, J., ...Lesinski-Schiedar, A. (2007). Automatic and attentive processing of sounds in cochlear implant patients – Electrophysiological evidence. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 25, 391–396.
- Näätänen, R. & Alho, K. (1997). Mismatch negativity. The measure for central sound representa-

- tion accuracy. *Audiology & Neuro-Otology*, 2, 341–353.
- Näätänen, R., Gaillard, A.W.K. & Mäntysalo, S. (1978). Early selective attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42, 313–329.
- Näätänen, R., Kujala, T. & Winkler, I. (2010). Auditory processing leads to conscious perception: A unique window to central auditory processing opened by mismatch negativity an related responses. *Psychophysiology*, 1–19.
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T. & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology*, 118, 2544–2590. doi: 10.1016/j.clinph.2007.04.026
- Oviatt, D.L. & Kileny, P. (1991). Auditory event-related potentials elicited from cochlear implant recipients and hearing subjects. *American Journal of Audiology*, 1, 48–55.
- Ponton, C.W. & Don, M. (2004). Cortical auditory evoked potentials recorded from cochlear implant users: methods and applications. Teoksessa H.E. Cullington (toim.) *Cochlear implants. Objective measures* (s. 187–230). Lontoo: WHURR.
- Ponton, C.W., Don, M., Eggermont, J.J., Waring, M.D., Kwong, B. & Masuda, A. (1996). Auditory system plasticity in children after long periods of complete deafness. *NeuroReport*, 8, 61–65.
- Ponton, C.W., Moore, J.K. & Eggermont, J.J. (1999). Prolonged deafness limits auditory system developmental plasticity: evidence from an evoked potentials study in children with cochlear implants. *Scandinavian Audiology, suppl. 5*, 13–22.
- Roman, S., Canévet, G., Marquis, P., Triglia, J.-M., & Liégeois-Chauvel, C. (2005). Relationship between auditory perception skills and mismatch negativity recorded in free field in cochlear-implant users. *Hearing Research*, 201, 10–20. doi: 10.1016/j.heares.2004.08.021
- Salo, S., Peltola, M.S., Alltonen, O., Johansson, R., Lang, H. & Laurikainen, E. (2002). Stability of memory traces for speech sounds in cochlear implants patients. *Logopedics, Phoniatrics, Vocology*, 27, 132–138.
- Sheppard, S. (1995). Cochlear implant systems. Teoksessa B. McCormick, S. Archbold & S. Sheppard (toim.). *Cochlear implants for young children*. Lontoo: WHURR, 5–24.
- Szücs D., Soltész, F., Czigler, V. & Csepé, V. (2007). Electroencephalography effects to semantic and non-semantic mismatch in properties of visually presented single-characters: The N2b and the N400. *Neuroscience Letters*, 412, 18–23. doi: 10.1016/j.heares.2004.08.021
- Tervaniemi, M., Lehtokoski, A., Sinkkonen, J., Virtanen, J., Ilmoniemi, R.J. & Näätänen, R. (1999). Test-retest reliability of mismatch negativity for duration, frequency and intensity changes. *Clinical Neurophysiology*, 110, 1388–1393.
- Teoh, S.W., Pisoni, D. B. & Miyamoto, R.T. (2004). Cochlear implantation in adults with prelingual deafness. Part II. Underlying constraints that affect audiological outcomes. *The Laryngoscope*, 114, 1714–1719.
- Wable, J., van den Abbeele, T., Gallégo, S. & Frachet, B. (2000). Mismatch negativity: a tool for the assessment of stimuli discrimination in cochlear implant subjects. *Clinical Neurophysiology*, 111, 743–751.
- Wang, L., Zhang, Q., Wang, Q., Dong, M. & Zeng, Y (2009). Functional evaluation of auditory system in patients with cochlear implant using electrically evoked auditory brainstem responses. *Acoustical Physics*, 55, 857–865. doi: 10.1134/S1063771009060207
- Wilson, B.S. & Dorman, M.F. (2008a). Cochlear implants: Current designs and future possibilities. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 45, 695–730. doi: 10.101682/JRRD.2007.10.0173
- Wilson, B.S. & Dorman, M.F. (2008b). Cochlear implants: A remarkable past and a brilliant future. *Hearing Research*, 242, 3–21. doi: 10.1016/j.heares.2008.06.005
- Välimaa, T. (2010). Katsaus sisäkorvaistutetta käyttävien aikuisten kuulonvaraiseen puheen havaitsemiseen. *Puhe ja kieli*, 4, 203–219.
- Välimaa, T & Lonka, E. (2010). Näkökulmia sisäkorvaistutetta käyttävien lasten puhutun kielen kehitykseen ja kommunikaatioon. *Puhe ja kieli*, 3, 125–132.

AUDITORY EVENT-RELATED POTENTIALS IN ADULTS WITH COCHLEAR IMPLANTS

Eila Lonka, University of Helsinki

Risto Näätänen, University of Tartu/ University of Århus

Kimmo Alho, University of Helsinki

In spite of the fast development of speech processor technology in cochlear implants (CI), there is considerable variability of speech perception abilities in adults with CIs. Auditory event-related potentials (ERPs) have been used as objective indices of the auditory-driven activation of cortical processes. This article aims at describing the recovery of hearing in adult CI users as revealed by ERPs, particularly the mismatch negativity (MMN) ERP response.

Keywords: Adults, audition, cochlear implant, event-related potentials, MMN.

