Sukellusfysiikan perusteita

Sukellussairaus on sukeltajien mieliä usein askarruttava tila, joka muistuttaa meitä siitä, että olemme haavoittuvia. Intoamme tehdä tutkimusretkiä rajoittaa tietoisuus mahdollisista seurauksista, joista yksi on sukellussairauden uhka. Aina kun liikumme poispäin ja ylöspäin maan keskipisteestä, ympäröivä paine pienenee. Näin tapahtuu sekä noustessamme ylöspäin syvällä vedessä että kohotessamme yläilmoihin. Sopivien olosuhteiden vallitessa tämä voi johtaa monimutkaiseen tapahtumasarjaan, jossa fysiikan lait vaikuttavat ihmisen fysiologiaan niin, että elimistössä syntyy vaurioita.

Paineen lasku voi aiheuttaa kahta erityyppistä vauriota sukeltajilla. Toinen on sukeltajantauti eli dekompressiotauti (DCS), ja toinen on ilmaembolia eli valtimokaasuembolia (AGE).Yhteisnimellä näitä kahta elimistön vauriotilaa kutsutaan sukellussairaudeksi (decompression illness). Molempia yllämainittuja tiloja yhdistää se, että ne syntyvät paineen laskiessa. Taustalla olevat syyt eroavat kuitenkin merkittävästi toisistaan.

AGE

AGE on vaurion aiheuttajana 29 prosentissa sukelluskuolemista ja liittyy todennäköisesti riittämättömään kaasujen poistoon, joka on laukaisevana tekijänä 41 prosentissa sukellusonnettomuuksista.1 Tulpat (emboli) ovat todellisia tai mahdollisia verisuonia tukkivia vierasesineitä. Ne voivat olla muodostuneita kaasusta, verihyytymistä,rasvasta, kasvaimista, lapsivedestä tai bakteerikasvustoista. Sukeltajien AGE-tapauksissa tukoksia aiheuttavat valtimokiertoon joutuneet kaasukuplat. Kuplien päätyminen valtimokiertoon johtuu keuhkorepeämästä tai painevauriosta keuhkoissa (vaurio keuhkokudoksessa johtuen paineen vaihtelusta). Näistä vaurioista johtuen kaasu pääsee karkaamaan keuhkorakkuloista eli alveoleista ja kulkeutuu valtimokiertoon.

Boylen laki selittää keuhkorepeämän synnyn nousun aikana. Boylen lain mukaan kaasumäärän tilavuus kasvaa kun ympäröivä paine laskee. Kääntäen kaasumäärän tilavuus siis pienenee, kun ympäröivä paine kasvaa laskeuduttaessa. Keuhkojen painevaurio syntyy herkimmin matalassa vedessä. Sukeltajien vedessä kokema paine muuttuu (suhteutettuna ympäröivään paineeseen pinnalla) eniten lähellä pintaa, noin 3 – 4 metrin matkalla pinnasta.

Kun kaasun laajeneminen saavuttaa sen pisteen, että keuhkorakkulat eivät kykene enää varastoimaan kaasua enempää, keuhkokudos vaurioituu. Tällöin keuhkoissa oleva ilma pääsee kulkeutumaan keuhkolaskimoihin, jotka palauttavat hapetetun veren sydämeen. Näin keuhkorakkuloista karannut ilma kulkeutuu myös sydämeen ja edelleen aivoihin, jolloin saattaa syntyä akuutti neurologinen vaurio. Tämä kaikki tapahtuu hyvn nopeasti, ja siksi myös AGE:n oireet ilmenevät hyvin nopeasti sukelluksen jälkeen, vain muutamien minuuttien kuluttua.

Keuhkojen painevammassa (barotrauma) voi vapaaksi päässyttä ilmaa kertyä myös keuhkojen välikarsinaan (keuhkojen välinen tila). Tätä vauriota kutsutaan nimellä pneumomediastinum. Kun ilmaa pääsee rintaonteloon keuhkojen ulkopuolelle, syntyy ilmarinta (pneumothorax). Vaarallisin tilanne sukeltajille syntyy silloin, kun ilmaa pääsee kulkeutumaan aivoihin. Tätä tilaa kutsutaan valtimokaasuemboliaksi aivoissa (CAGE).

CAGE:n oireet ilmenevät pinnalla tai lähellä pintaa heti sukelluksen jälkeen, ja noin 50 prosenttia CAGE:stä kärsivistä sukeltajista menee nopeasti tajuttomaksi. Joidenkin henkinen tila voi vaihdella äkillisesti.Toisilla esiintyy voimattomuutta tai koordinaation heikentymistä. Nämä kaikki ovat oireita ja merkkejä aivohalvauksesta ja ovat seurausta siitä, että veri ei pääse kunnolla virtaamaan kaikkialle aivoihin. Ne,

jotka selviävät ensimmäisestä sairauskohtauksesta, saattavat elpyä spontaanisti muutamien minuuttien sisällä. Heillä saattaa esiintyä joitakin eriasteisia neurologisia vaurioita, tai heidän toimintansa saattaa jopa palautua aivan normaaliksi.

Huolimatta siitä, että henkilön tila näyttää palautuvan normaaliksi, tulisi kaikkien AGE:n ja CAGE:n uhrien sekä keuhkojen painevammasta kärsivien käydä mahdollisimman pian sairaalan päivystyksessä tarkastuksessa. Joissakin tapauksissa potilaiden neurologiset oireet ovat uusiutuneet, vaikka he ovat vaikuttaneet jo täysin elpyneiltä. Ylipainehoitoon erikoistuneet lääkärit ovat yksimielisiä siitä, että jokaisen, jolla on neurologiseen vaurioon viittaavia oireita sukelluksen jälkeen, pitäisi käydä tutkituttamassa itsensä. Kaikkien AGE-diagnoosin saaneiden tulisi saada ylipainehappihoitoa (painekammiohoito).

Pään alueen tietokonetomografia eli viipalekuvaus kuuluu yleensä osana näiden potilaiden alkutarkastukseen, kun he tulevat päivystykseen. On tärkeää arvioida, onko potilaalla mahdollisia aivovammoja tai aivohalvaus ennen painekammiohoidon aloittamista. Painekammiohoito ei itsessään heikennä potilaan tilaa näissä tapauksissa, mutta mahdollinen aivoverenvuoto vaatii välitöntä kirugista hoitoa. Kallonsisäisten vuotojen ja verihyytymien muodostumisen estäminen on tärkeä toimenpide, sillä myös ne saattavat aiheuttaa äkillisen neurologisen vaurion. Jos edellä mainittuja vammoja ei ole, tauti voidaan todennäköisemmin diagnostisoida sukeltamiseen liittyväksi AGE:ksi, jolloin myös ylipainehappihoito on todennäköinen hoitomuoto.

DCS: Ongelmia kuplista

DCS saa alkunsa siitä, että reagoimattomat kaasut (typpi tai helium) imeytyvät kudokseen, kun noustaan vedessä ylöspäin ympäröivän paineen laskiessa. Alentuneessa paineessa kaasujen eliminointi saa aikaan kuplien muodostumista. Kuplien muodostuminen puolestaan saattaa johtaa tulehdustilaan kudoksissa ja edistää kudosvaurioiden syntymistä.

Tämän taudin ymmärtämisessä on olennaista tuntea Boylen, Henryn ja Daltonin lait. Boylen laki osoittaa sen, miksi meidän on jokaista hengenvetoa kohti hengitettävä sisään suhteellisesti suurempi määrä kaasumolekyylejä laskeutuessamme, jotta elimistömme kykenisi ylläpitämään rintakehässämme samansuuruisen paineen ympäristön paineen kanssa. Kaasumolekyylien lisääntyntyt määrä keuhkoissamme suhteessa veressä ja kudoksissa olevien molekyylien määrään saa aikaan diffuusion lisääntymisen, joka Henryn lain mukaan saa molekyylit liukenemaan liuokseen. Daltonin laki määrittelee sen, kuinka paljon ja mitä molekyylejä imeytyy. Tähän vaikuttaa myös se, että veren virtauksessa on eroja kehon eri osissa.

Mitä pidempään ja syvemmällä me uimme, sitä enemmän kaasua imeytyy kehoomme. Kun riittävä määrä reagoimatonta kaasua vapautuu liuoksesta ja muodostaa kuplia nousun aikana, siitä saattaa seurata paikallisia ja systeemisiä tulehdusreaktioita sekä vaikutuksia verisuoniin, jolloin henkilö tuntee todennäköisesti itsensä sairaaksi ja saattaa oireilla monin eri tavoin. Dekompressiotaudissa kuplia esiintyy ensisijaisesti laskimokierrossa ja kudosten sisällä, toisin kuin AGE:ssä. Näin ollen oireet saattavat ilmetä vasta useiden tuntien kuluttua.

DCS:än liittyy se, että elimistö kokee paineen alenemisestä johtuvaa stressiä, kun reagoimattomat kaasut kuormittavat sitä. Taudissa kuplia päätyy myös verenkiertoon. Vaikka dekompressiotautia ei voidakaan diagnostisoida korkeiden kuplapitoisuuksien perusteella (ultraäänellä tutkittaessa), ne ovat kuitenkin merkki huomattavasta paineen alenemiseen liittyvästä stressistä, ja korkeat pitoisuudet liittyvät huomattavasti useammin DCS:n oireiden puhkeamiseen kuin matalat kuplapitoisuudet. Oireiden puhkeamisaika korreloi jossain määrin sen kanssa, kuinka suuri reagoimattoman kaasun kuormitus on. Suuremmat määrät liittyvät oireiden pikaisempaan puhkeamiseen ja nopeampaan etenemiseen.

Mielenkiintoinen seikka liittyen dekompressiotautiin on se, että oireet puhkeavat usein paljon sen jälkeen, kun kuplat voidaan havaita. Siksi diagnoosia ei tehdä kuplien havaitsemisen perusteella, vaikka niiden esiintyminen kertookin paineen alenemisesta johtuvasta stressistä.

Dekompressiotaudin tämänhetkinen tutkimus keskittyy biologisiin merkkeihin, joita voidaan havaita verestä. Tutkijat tutkivat, onko paineen alenemisesta johtuvan stressin ja veressä esiintyvien kalvomikropartikkelien välillä mahdollisesti jotain yhteyttä. Nämä mikropartikkelit ovat kalvon ympäröimiä rakkuloita, jotka ovat muodostuneet eri solutyyppien kalvoista. Mikropartikkelitasot nousevat monien fysiologisten tautitilojen yhteydessä. Näin tapahtuu myös silloin, kun veressä esiintyvien kuplien aiheuttamaa stressiä pyritään poistamaan. Työhypoteesina on, että tietyt mikropartikkelit voivat saada aikaan DCS:än johtavan tulehdusvasteen, toimia sille merkkiaineena tai edistää tulehdusta. Nämä mikropartikkelit ovat saattaneet muodostua reagoimattoman kaasun muodostamien kuplien vaikutuksesta. Tällä hetkellä tutkimuksessa perehdytään taudin syntyyn kuplamallia syvemmin. Vaikka veressä olevat kuplat ovatkin merkittävä tekijä dekompressiotaudin kehittymisessä, niiden esiintymisen perusteella ei voida luotettavasti ennustaa DCS:n puhkeamista. Taudin kehittymisprosessin tutkiminen molekyylitasolla antaa meille paljon lisää tietoa, jonka avulla voimme toivottavasti kehittää sekä kyseisen taudin ennaltaehkäisyä että sen hoitoa.

Sukellussairauden hoito

Ylipainehapen (HBO) käyttö on sekä DCS:n että AGE:n varsinainen hoitomuoto. 100-prosenttisen hapen hengittäminen ennen varsinaista hoitoa voi nopeuttaa reagoimattomien kaasujen poistumista, vähentää oireiden vakavuutta ja tehostaa hoidon vaikutusta.

Yleisimmin käytetty ja hyväksytty alustava painekammiohoito-ohjelma on U.S. Navy Treatment Table 6 -taulukko. Potilaan tilasta riippuen hoito-ohjelma voidaan toistaa tai sitä voidaan laajentaa. DCI:n hoito on yhtä tehokasta sekä yksipaikkaisissa että monipaikkaisissa kammioissa. Yksipaikkaisissa kammioissa hoidetaan yhtä henkilöä kerrallaan, eikä kammiossa ole lääkintähenkilökuntaa. Monipaikkaisissa kammioissa voidaan hoitaa samanaikaisesti useita potilaita, ja siellä voi olla mukana myös henkilökuntaa. Tämä on tärkeää silloin, kun kyseessä on vakavasti loukkaantunut henkilö.

Evakuointi

Sukellusonnettomuuden sattuessa ihmiset luonnollisesti usein säikähtävät, ja siksi sukellussairautta epäiltäessä unohdetaan usein miettiä myös muita vaihtoehtoja loukkaantuneen sukeltajan oireille. DANin suositus loukkaantuneille sukeltajille onkin se, että he kävisivät tarkastuttamassa itsensä lähimmässä sairaalassa tai muussa lääketieteellisestä apua tarjoavassa paikassa. Näin voidaan sulkea pois muut vakavia sairauksia ja vammoja aiheuttavat tekijät. Jos diagnoosina todella on DCI, hoitohenkilökunta ja tarvittaessa myös DAN voivat aloittaa potilaan oikein ajoitetun siirron sopivaan ylipainehappihoitoa antavaan yksikköön.

Sukellusonnettomuudet synnyttävät paljon kysymyksiä. Sen jälkeen kun olet ollut yhteydessä paikalliseen ensiapuun, ota yhteyttä DANin päivystysnumeroon DAN Emergency hotline (+39 06 4211 5685), tai kehota hoitavaa yksikköä tekemään niin. DANilta voit saada tärkeää lääketieteellistä informaatiota ja myös apua evakuoinnin suunnittelussa ja järjestämisessä.

Kaasulakien tunteminen on olennaista, jotta DCI:n syntyä ja kehitystä voi ymmärtää.

Boylen laki: Vakiolämpötilassa annetun kaasun tilavuus on kääntäen verrannollinen ympäröivään

paineeseen.
Jotta voisimme säilyttää normaalin keuhkotilavuuden laskeutuessamme laitesukelluksen aikana, me hengitämme suhteellisesti enemmän kaasumolekyylejä jokaisella hengenvedolla.

Daltonin laki: Kaasuseoksen kokonaispaine on sama kuin kaikkien seoksessa olevien yksittäisten kaasujen osapaineiden summa.
Kun laskeutuessamme hengitämme enemmän kaasumolekyylejä jokaisella hengenvedolla, kohonneiden osapaineiden mahdollisella vaikutuksella on tärkeä merkitys.Typpinarkoosi on seurausta typen kohonneesta osapaineesta.

Henryn laki: Vakiolämpötilassa nesteeseen liukenevan kaasun määrä on suoraan verrannollinen nesteen yllä olevan kaasun osapaineeseen. Fysiologiassa tämä tarkoittaa sitä, että kaasun paine keuhkoissamme on suhteessa kaasun paineeseen veressä.
Mitä suurempi on kaasun paine keuhkoissamme, sitä enemmän kaasua liukenee vereemme ja kudoksiimme. Dekompressiotaudin synty perustuu tähän ilmiöön.