Voiko kyse olla yksinkertaisesti aineenvaihdunnasta? Uusi malli, joka selittää vaihtelun kuplien muodostumisessa

Sukellukseen liittyvän sukellussairauden (DCI) riskin on ajateltu johtuvan verenkierrossa kiertävistä kaasukuplista. Tätä tilaa kutsutaan verisuonten kaasuemboliaksi (VGE). Näiden kuplien on ajateltu muodostuvan niitä edeltävistä kaasumaisista mikroytimistä, jotka muodostuvat kaasun ylisaturaation seurauksena. Viime aikoina sukellussairaus on yhdistetty myös veren mikropartikkelien läsnäoloon ja oireisiin, jotka liittyvät tulehdusprosessiin.

Sukelluksen jälkeisiä verisuonten kaasuemboliakuplia voidaan mitata Doppler-laitteella ja sydämen ultraäänitutkimuksella. Niiden esiintymistä on pidetty merkkinä dekompressiostressistä, vaikka verisuonten kaasuemboliaa voi esiintyä ilman että seurauksena on sukellussairaus. Määrätyllä sukelluksella saadut havainnot kaasuembolian esiintymisestä osoittavat, että yksilöiden välillä on suurta vaihtelua. Tämä viittaa siihen, että kyse on yksilöllisestä alttiudesta. Tutkijat ovat itse asiassa havainneet, että tietyt ihmiset ovat alttiita kuplien muodostumiselle ja sukellussairaudelle, kun taas toiset näyttävät olevan immuuneja sukeltajantaudille. Toisaalta samalla sukeltajalla voi esiintyä vaihtelua kaasuemboliassa tietyllä sukelluksella. Tähän saattaa vaikuttaa äskeittäin toteutettu sukeltamista edeltävä liikunta. Nykyiset dekompressiomallit eivät kuitenkaan kykene selittämään mitään näistä vaihteluista.

Äskettäin on julkaistu DAN Europen tutkijoiden uusi tieteellinen artikkeli, joka pohjautuu uraauurtavaan tutkimustyöhön muutaman viimeisen vuosikymmenen ajalta. Tässä artikkelissa tutkijat esittävät ajatuksensa siitä, kuinka sukeltajan yksilölliset aineenvaihduntaprosessit saattavat aiheuttaa kuplien esiintymiseen liittyvän vaihtelun, jolloin seurauksena voi olla sukellussairaus. Tutkijoiden uusi malli puoltaa sekä yksilöllistä vaihtelua että niitä eroja, joita on havaittu sukellusta edeltävässä liikunnassa. Se myös valaisee veren mikropartikkelien alkuperää ja selittää havaitun vaihtelun verisuonten kaasuemboliassa ikään, kuntoon ja sukellusstressiin perustuen. Nämä tekijäthän on luokiteltu tärkeimmiksi riskitekijöiksi.

Jatkuvaa kuplimista

Artikkelin laatijoiden aineenvaihduntamalli rakentuu Brian Hillsin uraauurtavalle työlle liittyen kuplien kavitaatioon sekä viime aikoina myös tutkimukselle, joka on israelilaisen tutkijan Ran Arielin toteuttamaa. Ariel osoitti, että sukeltajan dekompressiokuplat voivat kehittyä vain aiemmin olemassa olleista kaasumaisista mikroytimistä. Niitä esiintyy aktiivisissa hydrofobisissa kohdissa, joita on löydetty verisuonten sisäpinnalta.

Toinen mallia tukeva tutkimusaihe koskee sukeltajan fyysistä harjoittelua ennen sukeltamista. Viime vuosikymmenen aikana toteutetussa yllättävässä tutkimuksessa vahvistettiin todeksi se, että vakaat, liikkumattomat nanokuplat ovat mitä todennäköisimmin olemassa sukeltajissa jo pinnalla oltaessa.

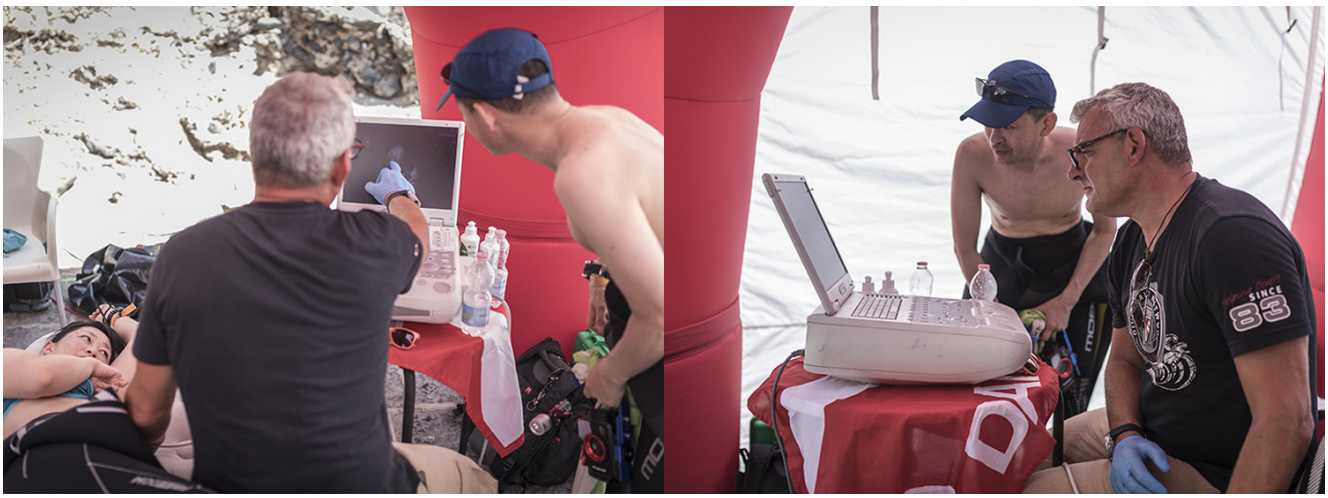
DANin tutkijoiden hypoteesi on, että sukeltajan aineenvaihdunta aiheuttaa sen, että syntyy joukko pieniä kaasupusseja. Näitä kutsutaan nimellä staattiset metaboliset kuplat (Static Metabolic Bubbles, SMBs), jotka kiinnittyvät verisuonten sisäpinnalle. Nämä kaasupussit toimivat sitten edeltäjinä sukelluksen jälkeen verenkierrossa kiertäville kaasukuplille (VGE).

Artikkelin laatijat olettavat, että SMB-kuplien muodostuminen on seurausta tunnetusta ilmiöstä, josta käytetään nimeä happi-ikkuna (Oxygen Window, OW). Kyseessä on hapen osapaine-ero sukeltajan keuhkorakkuloissa olevan paineen ja laskimokudoksessa olevan alemman paineen välillä. Keuhkorakkuloissa oleva paine on sama ympäröivän paineen kanssa. Osapaine-ero on seurausta aktiivisesta aineenvaihdunnasta. Tutkijat esittävät, että tämä painegradientti pitää yllä SMB-kaasukuplien joukkoa, kun sukeltaja on pinnalla. Mitä suurempi on gradientti, sitä enemmän syntyy SMB-kuplia. He tarjoavat matemaattisen yhtälön, joka kuvaa kuplien muotoa, volyymia ja dynamiikkaa.

Sukelluksen laskuvaiheen aikana SMB-kuplien määrä alenee Boylen lain mukaisesti. Kun sukeltaja sitten

tulee dekompressiovaiheeseen, kaasujen vaihto ruokkii olemassa olevia SMB-kuplia viereisen kudoksen diffuusion avulla. SMB-kuplat kasvavat niin kauan, että ne saavuttavat kriittisen volyymin voidakseen irrota verisuonten sisäpinnalta ja muodostaa varsinaisia kuplia.

Verisuonten keuhkoembolian kehittyminen riippuu näin ollen hydrofobisten kohtien lukumäärästä verisuonissa ja SMB-kuplien alkuperäisestä määrästä. Tämä puolestaan riippuu sukeltajan aineenvaihdunnasta. Nousun nopeus, joka saa aikaan diffuusion gradientin, ohjaa SMB-kuplien kasvun nopeutta ja sitä, miten nopeasti ne saavat aikaan verisuonten keuhkoembolian. Lisäksi SMB-kuplan irrotessa verisuonten sisäpinnalta niiden oletetaan irrottavan samalla mikropartikkeleita, jotka voivat sen jälkeen kulkeutua keuhkojen ja sydämen suodattimien läpi ja saavat aikaan tulehdusreaktion, joka on yksi osa sukellussairautta.



Kuplien esiintymisen vaihtelevuus ja sukeltamista edeltävän fyysisen harjoittelun merkitys

Tämän mallin mukaan ennalta olemassa oleva SMB-kuplapopulaatio edustaa sukeltajan ensisijaista yksilöllistä ominaisuutta, joka määrittelee sukelluksen jälkeisen verisuonten kaasuembolian kehitysasteen samoin kuin tulehduksen. Tämän SMB-populaation avulla voitaisiin selittää kuplien vaihtelut, joita on havaittu eri sukeltajien välillä. Aineenvaihdunnan tiedetään hidastuvan iän myötä, ja näin ollen tämä voisi selittää myös vanhemmilla sukeltajilla tavattavat korkeammat keuhkoemboliatulokset.

Samoin aineenvaihdunnan tiedetään olevan lineaarisesti yhteydessä sydämen lyöntitiheyteen levossa ja sen logaritmi on suhteessa kehon massaan. Tästä seuraa oletus, että kuntoilu kasvattaa happi-ikkunaa. Niinpä tämä voisi selittää verisuonten kaasuembolian vähäisemmän esiintymisen hyväkuntoisilla sukeltajilla. Mielenkiintoista on se, että kun DANin tutkijat analysoivat DSL-laboratorion sukellustietokantaa, he tulivat siihen johtopäätökseen, että vain kaksi tekijää, ikääntyminen ja kehon painoindeksi, voidaan yhdistää lisääntyneeseen kuplien muodostukseen.

Kyseinen malli valaisee myös viimeaikaista tutkimusta, joka liittyi sukeltamista edeltävään kuntoharjoitteluun. Tässä tutkimuksessa osoitettiin, että mekaaninen tärinä samoin kuin etukäteen hengitetty happi vähentävät dekompression jälkeistä kaasuemboliaa. Nämä toiminnot voivat todennäköisesti irrottaa SMB-kuplia ja vähentää niiden määrää ennen sukeltamista, jolloin seurauksena on kaasuembolian väheneminen. Samoin tämä malli vastaa samoin myös niitä tutkimuksia, joissa on osoitettu, että pitkitetty vuodelepo lisäsi merkittävästi kuplien määrää dekompression jälkeen. Tämän vuodelevon avulla oli tarkoitus matkia avaruusmatkailun aikaista painovoiman minimaalista vaikutusta,

joka oli seurausta ilmasukelluksista.

Aineenvaihdunnan dekompressioalgoritmit?

Vaikka verisuonten kaasuembolian ja sukellussairauden riskin välillä ei ole suoraa yhteyttä, voidaan kuitenkin todeta, että mitä vähemmän on kuplia, sitä pienempi on sukellussairauden riski. Artikkelin laatijoiden johtopäätös on, että verisuoniin pääsevien kaasukuplien määrä ja keuhkojen suodatuskapasiteetti vaikuttavat ratkaisevasti valtimoiden kuplaesiintymisen todennäköisyyteen ja näin ollen myös sukellussairauden puhkeamiseen. Kuten aiemmin jo pohdittiin, saattaa laskimoiden kuplien irtoaminen synnyttää myös mikropartikkeleita, jotka voivat saada kudoksissa aikaan samanlaisen tulehduksen kuin mitä kuplat aiheuttavat.

Artikkelin kirjoittajat ovat sitä mieltä, että tulevaisuuden dekompressioalgoritmeissä sukellussairauden riskille asetettavat turvallisuustasot vaativat sellaisten erilaisten parametrien arviointia, jotka perustuvat sukeltajan yksilöllisiin ominaisuuksiin. Mahdollisesti voidaan olemassa olevien algoritmien M-arvoja ja gradienttifaktoreita täydentää näiden ominaisuuksien perusteella.

On tarpeen kiinnittää huomiota siihen, että yksittäisen sukeltajan ominaisuuksiin perustuvat uudet algoritmit eivät välttämättä tuota kovinkaan erilaisia dekompressioprofiileita verrattuna niihin, jotka jo takaavat riittävän turvallisuustason riskeihin nähden. Uusi aineenvaihduntaan perustuva malli voi kuitenkin tarjota paremman konservatiivisuuden hallinnan ja antaa sukeltajille mahdollisuuden valita sellainen dekompressiostressin taso, jonka he ovat valmiita hyväksymään kyseessä olevalle sukellukselle.

Tietoa artikkelin kirjoittajasta

Michael Menduno on palkittu toimittaja ja tekniikan alan asiantuntija, joka on kirjoittanut sukeltamisesta ja sukellusteknologiasta monen vuosikymmenen ajan. Hän on luonut termin "tekniikkasukellus", ja hänen kirjoituksiaan on julkaistu esimerkiksi seuraavissa lehdissä: Alert Diver, DIVER, Quest, Scientific American, Scuba Times, Sports Diver, Undercurrent, Undersea Journal, WIRED ja X-Ray. Menduno perusti aquaCORPS-lehden ja toimi sen päätoimittajana. Tämä lehti auttoi osaltaan tekniikkasukellusta pääsemään mukaan urheilusukelluksen valtavirtaan. Mendunon ansiota ovat myös ensimmäiset Tek-, EuroTek- ja AsiaTek-konferenssit.