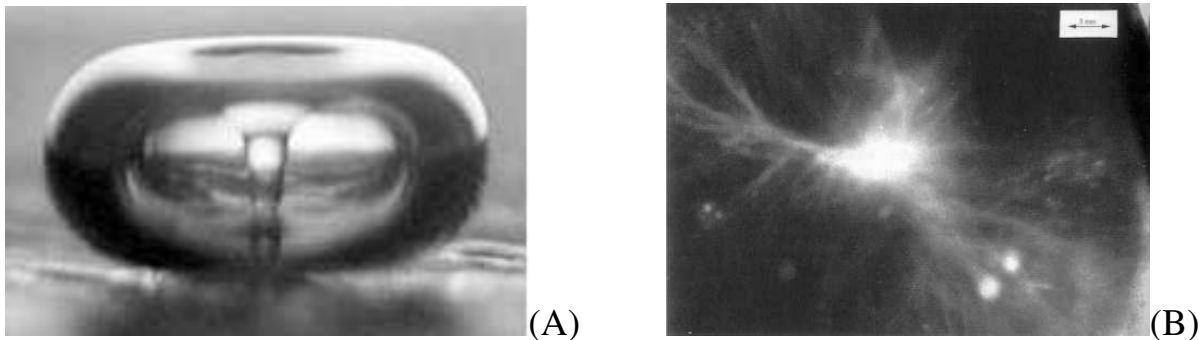


2.3. AKUSZTIKAI KAVITÁCIÓ

Nagyon fontos akusztikai jelenség a kavitáció, melynek a széleskörű laboratóriumi és ipari alkalmazásai miatt érdemes egy külön fejezettel adóznunk. A kavitáció folyadékban történő üreg-, vagy buborékképződést jelent (13. ábra). A 13. ábra bal oldalán egy szilárd fal mellett kialakult „jet” vagy túszerű belövellést mutató kavitációs buborékot láthatunk, míg a jobb oldalon egy szabad folyadékközeggel határolt kavitáció, vagyis üreg látható. Mindkettő úgynevezett „tranzien, vagy tehetetlenségi kavitáció”.



13. Ábra: Tranzien kavitációs üreg (A, szilárd fal melletti „jet formájú” és B, szabad folyadékkal határolt tranzien kavitáció)

A kavitációs jelenség olyan folyadékokban alakul ki, amelyek akusztikai zavarnak, vagy talán esetünkben egyszerűbben érthető, hogy ultrahang besugárzás hatásának vannak kitéve és akkor, ha az akusztikai nyomás a hangciklus ritkulási fázisának folyamán a teljes nyomást nézve lecsökken egy bizonyos küszöb, vagy határérték alá. Ez a határérték a kavitációs küszöb. A kavitációs küszöb akusztikai nyomás amplitúdó határértéke számos fizikai paraméter függvénye, amelyek a közeg állapotát írják le. Ezekhez a fizikai tényezőkhöz tartozik a hangintenzitás, a hangfrekvencia, a hőmérséklet, a

nyomás, az oldott gáz típusa, mennyisége, a viszkozitás, a közeg előélete, a kavitációs magok típusa, mennyisége, az oldott ion koncentráció, stb.

2.3.1. KAVITÁCIÓS MAGOK

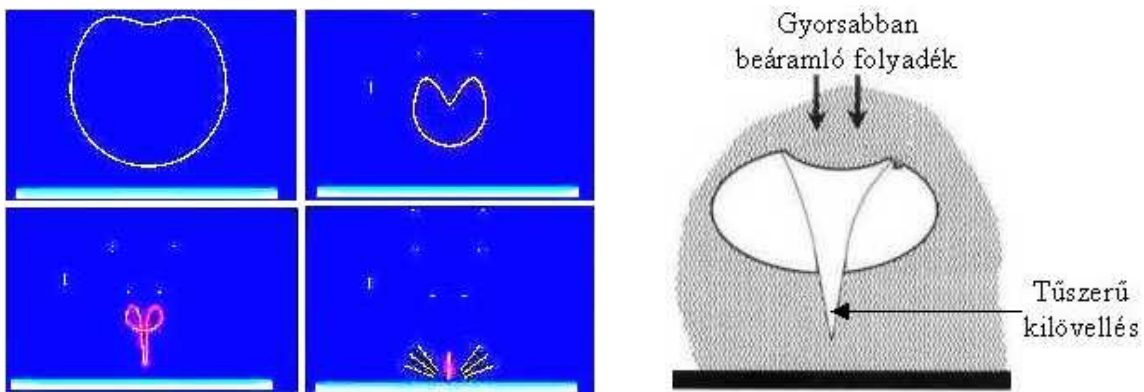
Fontos megjegyezni, hogy a kavitációs üregek úgynevezett kavitációs magokból növekednek ki. Több elméleti modell áll rendelkezésünkre a kavitációs magokra, melyek közül a legfontosabb a szerves bőr modell és a hasadék modell. A szerves bőr modell azt jelenti, hogy a mikro-buborékokat apoláris és poláros részekből álló molekulák filmszerű rétegének stabilizációja óvja meg a gáz folyadékba történő diffúziója ellen. A hasadék-modell pedig azt jelenti, hogy a folyadékokban lévő mikro-méretű szennyeződések, illetve az edény falain, illetve a szilárd felületeken szintén mikro-méretű hasadékok találhatóak, melyekben csapdázott gáz található. Ebből a „gázzsebből” (gas pocket) az oszcilláló hullámtérben a negatív nyomási fázisban fog „kinőni” a kavitációs üreg. Voltak, akik figyelembe vették a folyadékok felületi feszültségét, melyek befolyásolják a gázzsebben stabilizált kavitációs mag folyadékkal alkotott érintőszögeit, amely azt befolyásolja, hogy mekkora akusztikai nyomás amplitúdóra van ahhoz szükség, hogy ez a gázzseb, vagy gáz test „aktiválódjon” (gas body activation).

2.3.2. KAVITÁCIÓ TÍPUSOK

Minimum két különböző kavitációtípust, vagyis folyadékban történő üreg,- vagy buborékképződést célszerű ismerni, és tudni megkülönböztetnünk a hatékony ultrahangos munkánkhoz.

2.3.2.1. TRANZIENS (TEHETETLENSÉGI) KAVITÁCIÓ

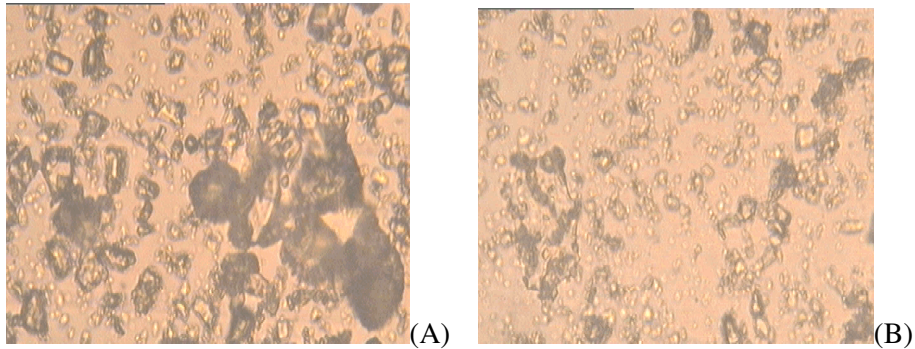
Az első, a fent említett (13. ábra) tranziens, tehetetlenségi, vagy hard kavitáció, amely során a kavitációs üreg egy akusztikai ciklus során megnövekszik, majd hevesen összeomlik. Amennyiben ez az összeomlás szilárd fal, vagy felület mellett zajlik (sejtmembrán, szivattyú rotor, hajócsavar, stb.), úgy az a falra nézve drámai következményekkel jár, a következő mechanizmus szerint (14. ábra).



14. Ábra: Tranziens kavitáció összeomlás szilárd fal mellett (A, az összeomlási folyamat, B, tűszerű kilövellés „jet”)

Szilárd fal melletti kavitációs üreg tranziens összeomlása során a kavitációs üreg szilárd fal felőli oldalán, a szabad folyadék felőli oldalhoz képest a közegáramlás összetevője erőteljesen lecsökken. Ezért a kavitációs üreg falának mozgása a középpontjához képest aszimmetrikussá válik. Ezáltal az üreg folyadékból alkotott falának a szilárd fallal ellentétes oldala nagyobb sebességre szert téve fog az üreg középpontja felé mozogni, mint a szilárd fal felőli üregoldal. Az üreg falának aszimmetrikus egyre gyorsuló mozgása a leggyorsabb részen egy tűszerű folyadéksugár kialakulását eredményezi, ami tehetetlensége miatt nagy sebességgel átdöfi a buborékot (13.A., 14. ábra), ezzel a vele szemben elhelyezkedő szilárd falat, így például sejteket, szivattyúlapátokat, hajócsavart, ultrahangkészüléket, kőszemcséket erőteljesen erodálja (15. ábra). A 15. ábra azt mutatja be, hogy a tranziens kavitációs

buborékok a dolomit szemcsékre milyen drasztikus hatással vannak. A kiindulási állapothoz képest, hozzávetőleg 10 perces 1Mhz-es $12\text{W}/\text{cm}^2$ teljesítményű kezelés után, szemmel látható módon lecsökkent a szemcsék mérete, azaz erodálódtak.



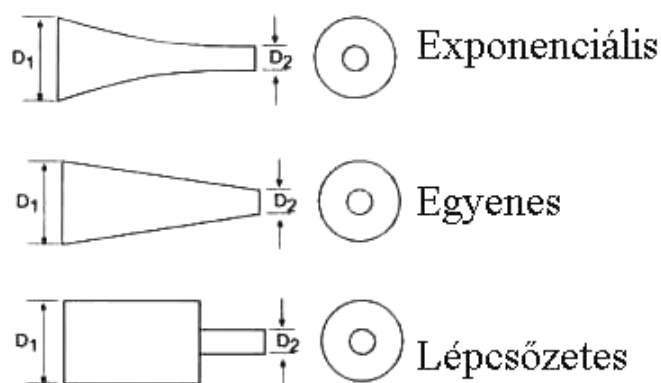
15. Ábra: Dolomit szemcsék ultrahangos eróziója (A, kiindulási állapot, B, 15 perc kezelés utáni állapot (Forrás: Lőrincz, A., 2003))

Az erózió miatt kell cserélhető titánhegyet vennünk és bizonyos időszakonként cserélnünk is az ultrahang berendezésünkön található mechanikai erősítő oszlopon (16. ábra). Amennyiben a kavitáció nem szilárd fal mellett omlik össze, úgy inkább a kémiai roncsoló hatás érvényesül, mivel a tranziens kavitáció során a molekulák széttöredezése is megfigyelhető. A molekulák roncsolódása főleg az erőteljes mechanikai lökeshullámnak, illetve mikroáramlásoknak, illetve az összeomlásakor kialakuló $10\text{-}35000\text{K}$ hőmérsékletnek és a több ezer bar nyomásnak köszönhető.



16. Ábra: Konvencionális ultrahangos sejtroncsoló séma

A kavitációs erózió hatására változik a transzdúcer, illetve a mechanikai erősítő rudak hossza, ezáltal megváltozik azok rezonanciafrekvenciája, illetve az a pont, ahol a hullám elhagyja a transzdúcerünket. Mivel eredetileg a legnagyobb hatékonyságra tervezett $\lambda/2$ valahányszorososa a transzdúcer és mechanikai erősítő rúd hossz (17. ábra), ezért az eróziótól erősen lecsökken a kezelő berendezésünk hatékonysága. Az tehát egy trükk lehet a hatékony ultrahangos munkáért, ha figyelemmel kísérjük a berendezésünk minőségét és ha szükséges, akkor beavatkozunk.



17. Ábra: A legáltalánosabb mechanikai erősítők

Az eróziót onnan ismerjük fel legjobban, hogy a felcsavarozható titán hegyen (tip) bevésődések, egyenetlenségek jelennek meg. Ekkor azonnal cseréljük le ezt az alkatrészt, amit egyszerűen ki és vissza lehet csavarni.

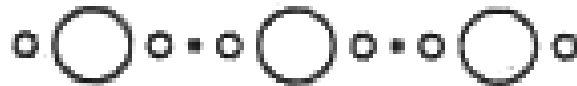
A következő trükkünk a hatékony ultrahangos tevékenységért pedig azon alapszik, hogy mivel a tranziens kavitáció szerencsénkre hangjelenséggel jár, mégpedig olyanal, amit mi is hallunk (a laboránsok szerencsétlenségére), ezért a saját érzékeinkre hagyatkozva képesek lehetünk megállapítani, hogy mikor

történik a céljainknak legmegfelelőbb munkavégzés. Tehát, abban az esetben, hogy ha a besugárzás folyamán 16kHz, vagy efelett működő berendezésünknel éles, pattogó, vagy sístergő hangot hallunk (21. ábra), ez nagyon jó jel lehet, mivel a rosszul hangolt akusztikai berendezés szétesése előtti alharmonikus kibocsátás bűnös gondolatának elodázása után örömmel konstatálhatjuk, hogy a rendszerünkben tranziens kavitáció található. Ez pedig az anyagra nézve drasztikus tevékenységet folytatók számára öröm kell, hogy legyen, mivel hozzásegítheti őket céljaik eléréséhez. Abban az esetben, amikor viszont nem halljuk ezt a hangot és éppen például sejtfeltárást folytatunk, akkor ne habozzunk növelni az amplitúdót, vagy újra hangolni a berendezést, illetve ellenőrizni, hogy mindent helyesen állítottunk-e össze, mivel ekkor minden egyes kezelési perc feleslegesen múlatott idő. Tehát emberi fül számára is hallható jelei vannak a tranziens kavitációnak, amely kavitációtípus az anyag roncsolódását okozza.

2.3.2.2. STABIL KAVITÁCIÓ

A másik fontos ismerendő kavitációtípus a stabil kavitáció. Stabil kavitáció akkor történik, ha a buborék számos cikluson keresztül oszcillál, a térből való távozás, vagyis felszínre vándorlás, illetve összeomlás nélkül és a depresszió alatt mérete csökken, majd az ellenkező fázisban újra kitágul, mivel gőzt tartalmaz (18. ábra). Bizonyos esetekben a depressziós akusztikai ciklus alatt tágul, az ellenkező akusztikai fázisban pedig zsugorodik a buborék, amelynek az erőteljes több ezer kelvines hőképződés lehet az eredménye. A tranziens kavitáció nem, vagy csak elenyésző mértékben tartalmaz gőzt, mivel olyan hevesen zajlik le, hogy a diffúzióra nagyon kevés idő áll rendelkezésre. De nem úgy a stabil kavitációnál. Ebben az esetben a buborék valóban buborék formájú és a mikro méretű buborékból a látható „nagy” buborékká való növekedéséhez nagyon sok ezer, sőt akár több millió oszcillációra is szükség

van (1MHz-en 1 másodperc alatt 1.000.000 hangciklus van, 10kHz-en pedig 10.000). Ebben az esetben ez alatt a számos hangciklus alatt van ideje az oldott gázoknak, a vízgőznek és az egyéb anyagoknak a buborékba diffundálni. A stabil kavitációs buborék az oszcilláló akusztikai tér miatt saját frekvenciával rendelkezik, illetve általában további felületi rezgések is kialakulhatnak rajta (al, és felharmonikusok kiváltói), melyek a buborék környezetében erőteljes turbulenciákat indukálnak. Ezeket a turbulenciákat nevezzük mikroáramlásoknak, melyekre magas nyíróerő a jellemző, és amelyet a sejtbioológiai hatások egyik kiváltójaként tartanak számon.



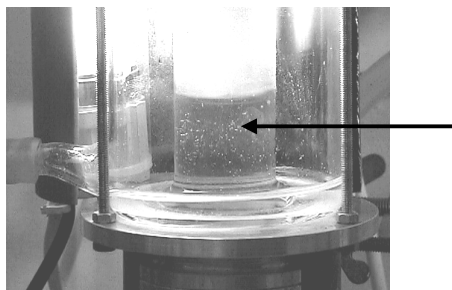
18. Ábra: A stabil kavitáció sémája

A stabil kavitációs buborékok az akusztikai tér oszcillációjától vezéreltetve egy adott rezonanciafrekvencián sugárzóvá válnak. A buborékok eltérő rezonanciafrekvencián pedig eltérő egyensúlyi méretűek. Ez azt jelenti, hogy amennyiben a vivőfrekvencia, azaz az a berendezésünk kibocsátott frekvenciája magasabb, akkor kisebb, míg az alacsonyabb vivőfrekvenciák mellett nagyobb ez az egyensúlyi, rezonanciafrekvenciára jellemző buborékméret. A stabil kavitációs buborék pedig „ekörül” az egyensúlyi méret körül oszcillál, azaz tágul és szűkül, az akusztikai tér váltakozásának megfelelően, vagy azzal ellentétesen, vagy fáziseltolódással. A buborékok, az önállóan kibocsátott hangsugárzás által szétterítik, eloszlatják, csillapítják, szórják az eredeti akusztikai energiát a hangtérben. A gázzal telt stabil kavitációs buborékok rezonanciafrekvenciája (f_0) a [4]. egyenlet szerint:

$$f_0 = \omega_0/2\pi = 1/2\pi R_0 \sqrt{3\kappa p_0/\rho} \quad [4]$$

A képletben a (ρ) a folyadék sűrűsége, (p_0) a környezeti nyomás, (R_0) a gázbuborék sugara, (f_0) a rezonancia frekvencia, (κ) a politrópikus index, azaz a fajhők aránya, vagyis az állandó nyomáson és az állandó térfogaton vett fajhők hányadosa, (ω_0) a körfrekvencia ($\omega=2\pi f$), az (f) pedig az ultrahang frekvenciája. Látható a [4]. egyenletben, hogy a rezonanciafrekvencia és a buboréksugár milyen szoros összefüggésben állnak. Akkor beszélünk vízbéli levegőbuborékokról, ha azok átmérője nagyobb, mint $10\mu\text{m}$. Ebből azt tudjuk pontosan meghatározni, hogy amennyiben egy adott méretű stabil kavitációs buborékokra van szükség, például szonokémiai alkalmazásra, akkor mekkora az a vivőfrekvencia, amellyel dolgoznunk kell.

Kijelenthető, hogy ha szabad szemmel látjuk a folyadékban a kavitációs buborékokat, akkor minden bizonnyal stabil kavitációval van dolgunk (19. Ábra).



19. Ábra: Stabil kavitációs buborékok (Forrás: Lőrincz, A., 2003)

Miért is fontos nekünk, hogy milyen típusú kavitációs buborékok, vagy üregek vannak a rendszerben? Azért, mert mindkét kavitációtípust másra lehet és kell is használni! Számos tudományos közlemény vitatja és bizonyítja a mai napig a stabil kavitáció, vagyis az oszcilláló, gázzal telt buborékok hatékony roncsoló hatását, a mikroáramlások nyíróerején keresztül. Azonban a tranziens kavitáció hatékonyságát soha senki nem kérdőjelezte meg, (illetve aki még a

XX. század elején ezt megtette, később saját maga bizonyította, hogy nem volt igaza) és ez a lényeg! A stabil kavitáció alacsonyabb intenzitásszintek mellett is kialakuló határjelenség, amit például a magas sejt, vagy szemcsekoncentráció, az alacsony oldott gáztartalom, stb. egyszerűen megszüntet. Ezáltal állandó kontroll alatt kellene tartanunk a rendszert, amire ésszerűen természetesen egy technológiai sorban alkalmazott eszköznél sincsen mód. Ezáltal amennyiben arra törekszünk, hogy minél hatékonyabb ultrahangos munkát végezzünk, akkor célszerű a kavitációs határzóna feletti intenzitással (amplitúdóval) dolgoznunk, amelynek hatására a biztató fülsértő éles hang (kavitációs hang = cavitation noise) kompenzálása kapcsán a laboratóriumi rádiókat e munkafázis időtartamára feljebb kell hangosítani.

Továbbá ne feledjük bizonyos időszakonként ellenőrizni a titánhegy állapotát a mechanikai erősítőrúdon, illetve ha szükséges, akkor cserélni azt.

2.3.1. A KAVITÁCIÓRA, ILLETVE AZ AKUSZTIKAI JELENSÉGEK KIALAKULÁSÁRA VONATKOZÓ VIZSGÁLATOK

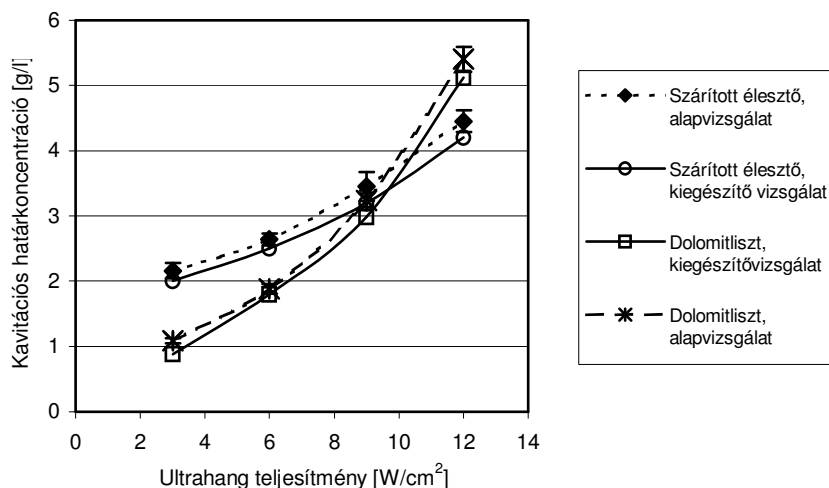
A következőkben a sejtkoncentráció fontosságára hívom fel a figyelmet, melynek a kavitációra gyakorolt hatását vizsgáltam. Anélkül, hogy különösebben belemennék a tudományos kutatások dzsungelébe, és a mélyebb fizikai összefüggésekbe, inkább csak említésszerűen utalnék a sejtkoncentráció jelentőségére a kavitációs jelenséggel kapcsolatban (20. ábra).

1,117MHz frekvencián különböző intenzitásszintek mellett liofilizált *Saccharomyces cerevisiae* élesztőgombát és az élesztőgomba átlagos sejtnagyságával megegyező nagyságú szemcsékből álló dolomitliszt szuszpenziót alkalmaztam modellanyagként, annak vizsgálatára, hogy meghatározam, hol van a kavitációnak, illetve az állóhullámnak a határkoncentrációja.

A határkoncentráció az a koncentráció, ahol az egyik akusztikai jelenség a másikkal szemben küszöbszerűen dominanciára jut, vagyis esetemben a tranziens és a stabil kavitációból állóhullám, majd állóhullámból akusztikai áramlás alakul ki. A későbbiekben látjuk majd, hogy azért elengedhetetlenül fontos ennek a küszöbértéknek az ismerete, mert e nélkül nem lehet biztonságosan ultrahangos munkát végezni. A küszöbérték ismeretének hiányában csak vakrepülés az általunk végzett tevékenység. Az egyes akusztikai jelenségeknek ugyanis teljesen eltérő biológiai, fizikai és kémiai hatása van az anyagra.

A kísérleteket pohárszerű kialakítású alulról besugárzott akusztikai kamrában hajtottam végre (26. ábra), de bármilyen ultrahang berendezés esetén elvégezhető ez a vizsgálat. A továbbiakban ajánlanám ezt azoknak, akik sejtfeltárást, vagy roncsolást, ülepítést végeznek az ultrahang segítségével.

A kísérleteket alap és kiegészítő módszer szerint hajthatjuk végre, melynek az a lényege, hogy az alapvizsgálatnál egy adott folyadékmennyiséget helyezve a kezelőedénybe (26. ábra), majd az ultrahangot rákapcsolva, a kavitáció jelenségének a jelenléte mellett, addig szórjuk a modellszemcséket a hangtérbe, amíg a tranziens kavitációs zaj hallható. Ezután a maradék szemcsemennyiséget visszamérve, illetve a vizsgálatot többször megismételve, alakul ki az alapvizsgálat végeredménye, a fogyott anyagmennyiségre vonatkozóan, egy adott ultrahang teljesítményre. Vagyis innen kapjuk meg a diszpergáló közeg mennyiségének az ismeretében a kavitációs határkoncentrációt. A kiegészítő módszerrel pontosítható tovább a kapott eredmény, megközelítéssel módszer segítségével.



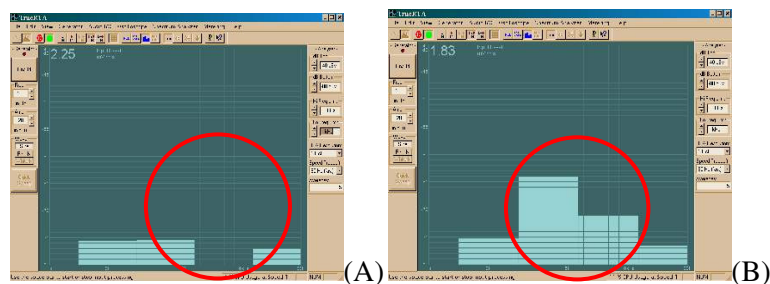
20. Ábra: Kavitációs határkoncentráció alakulása az alkalmazott ultrahang teljesítmény függvényében, különböző modellanyagok esetén (Forrás: Lőrincz, A., 2003)

Látható a 20. ábrán, hogy mindkét modellanyag esetében növekedett a kavitációs határkoncentráció az ultrahang teljesítmények növelésével.

Ezt az eredményt a gyakorlat számára lefordítva azt jelenti, hogy az egyre magasabb amplitúdókkal egyre magasabb koncentrációjú szuszpenziók, vagy valódi oldatok mellett vagyunk képesek kialakítani a kavitáció jelenségét. Tehát amennyiben például sejtfeltárást folytatunk és a sejtsuszpenzió koncentrációja a kavitáció jelenlétének megfelelő koncentrációhoz szükségeshez képest relatíve magasabb, abban az esetben növelnünk kell az ultrahang intenzitást ahhoz, hogy a célunkat a kavitáció segítségével elérjük. Ha az intenzitás további növelésére nincs mód, akkor a szuszpenziót fel kell hígítani, ugyanis a kavitáció kialakulásánál nem a hangtérben lévő anyagmennyiség számít, hanem kizárólag csak a koncentráció. A diszpergálószerrel történő hígítás azért is hatékony, mivel az általában sok kavitációs magot vihet magával az anyagba, amely láncreakciószerűen váltja ki a heves akusztikai jelenséget. Ez persze logikus megállapítás, azonban az alkalmazott gyakorlat, de még az alkalmazó

tudományos világ számára sem teljesen egyértelmű a szakcikkek alapján, így egy trükk lehet a célirányos ultrahang felhasználás érdekében.

Ahhoz pedig, hogy a már az előzőekben oly sokat emlegetett roncsoló hatású tranziens kavitáció ultrahangtérbeli jelenlétéről minden kétséget kizáró bizonyítékot adjak közre, elegendő rápillantanunk egy frekvenciaanalízáló szoftver 21. ábrán látható szonogramjára. A 21. ábrán kiválóan megfigyelhető a kavitációmentes háttérzaj és az erre szuperponálódó kavitációs + háttérzaj ábrája közötti különbség. A frekvenciaanalízist, a minden egészséges ember számára jól hallható 4-6kHz frekvenciatartományban végeztem el és jól látható a körben elhelyezkedő kiemelkedő oszlop a jobboldali 21.B. ábrán, mely a kavitációs zajkibocsátást mutatja. A kavitációs zaj a tranziens kavitáció sziszegéséből, pattogásából, illetve a stabil kavitáció alharmónikus kibocsátásából származik.



21. Ábra: A kavitáció által kibocsátott 5kHz körüli frekvenciatartományok szonogramjai, (Abszcissza: frekvencia (Hz), ordináta: intenzitás (mV). Balról háttérzaj, jobbról kavitációs + háttérzaj.) (Forrás: Lőrincz, A., 2003)