

## Cincinatti Egyetem, Vizsgálati eredmények

### Az ActivTek ActivePure technológia hatása a levegőszennyeződésekre

#### Összefoglaló:

Az ActivTek's Fresh Air Technology (ActivTek friss levegő technológia) tesztelését egy 18 hónapos vizsgálat keretében, a Cincinatti Egyetem Környezetegészségügyi Intézetében, az Egészségügyi vonatkozású aeroszol részecske vizsgálatok központjában végezték, Dr. Sergey Grinshpun professzor irányításával.

A tesztelés a Fresh Air rendszerben alkalmazott két technológiát egyesítette: a negatív ionizációt és a fotokatalízist; egy innovatív, szabadalmaztatott fotokatalitikus reaktor, az ActivePure néven ismert Sugárzó Katalitikus Ionizációs reaktor révén.

#### A technológiákat egymástól független értékelésnek vetették alá:

- A Fresh Air ionizációs technológia a természetes bomlással (gravitáció) szemben akár 250-szeresével tudta csökkenteni a levegőben lebegő részecskék mennyiségét a beltéri levegőben.
- A Fresh Air Sugárzó Katalitikus Ionizációs rendszer (ActivePure -RCI) kevesebb mint 60 perc alatt tudta hatástalanítani a levegőben lévő mikroorganizmusok mintegy 90%-át. A vizsgált mikroorganizmusok az MS2 vírus és a lépfene helyettesítőjeként használt B. Subtilis voltak.

Dr. Grinshpun arra a következtetésre is jutott, hogy a két technológia ötvözése jóval nagyobb mértékben csökkentette a levegőben lévő bioszennyeződések (biokontaminánsok) mennyiségét, mint a két eljárás valamelyike, a másiktól függetlenül alkalmazva.

#### A szerzőről:

Dr. Grinshpun az aeroszolos vizsgálatok e fontos területének egyik legelismertebb tudósa. Pályafutása során Dr. Grinshpun szerzője vagy társszerzője volt mintegy 390 tudományos publikációnak, beleértve a szakajtóban megjelent több mint 120 eredeti cikket, 90 könyvfejezet és teljes eljárás-jegyzőkönyvet, valamint mintegy 180 konferencia-összefoglalót. Bírálóként, lektorként, testületi tagként és szaktanácsadóként is működik számos nemzeti ügynökségnél és szakmai szervezetnél, nagyvállalatoknál és kutatóintézeteknél, országos és nemzetközi szinten egyaránt. Ezenkívül részt vesz négy nemzetközi forgalmú folyóirat szerkesztőségi munkájában. Dr. Grinshpun aeroszolkutatásban elért eredményeit az alábbi díjakkal ismerték el: Európai Aeroszol Közgyűlés által adományozott

Nemzetközi Smoluchowski-díj (1996, Hollandia), AIHA, Aerosol Paper Award (1997, USA) (Amerikai Ipari Higiéniai Egyesület, Kielemkedő aeroszol-tanulmány díja), valamint a David L. Swift Emlékdíj (2001, USA). Két John M. White-díjat is kapott az AIHA-tól (1997, 1998, USA) a légzőszervek védelmével kapcsolatos vizsgálatokban való közreműködésért, valamint az USA Lakás- és Városfejlesztési Minisztérium Legjobb gyakorlatért járó díját a beltéri levegőben lévő ólomzott részecskék kutatásáért. (USA Department of HUD (2000) Best Practice Award).

#### Az egyetemről:

A Cincinatti Egyetem az USA egyik legfontosabb környezetegészségügyi egyeteme.

#### A vizsgálatról:

Dr. Grinshpun és csapata által végzett vizsgálat a beltéri levegőben lévő aeroszol-szennyeződések csökkentésére fókuszált, két technológiai megoldás alkalmazásával:

- 1) Az unipoláris ionkibocsátás miatt létrejövő részecskekoncentráció csökkenése
- 2) Mikroorganizmusok inaktíválása az ActivePure – RCI (Sugárzó Katalitikus Ionizáció) elnevezésű fotokatalikus folyamat által kivitelezett fotokatalikus reakció alkalmazásával.

#### Eredmények:

A tanulmány arra a következtetésre jut, hogy az ionizáció és az oxidáció eljárásainak az alkalmazása lényegesen kisebb hatást mér a levegőben található potenciálisan káros szennyeződésekre, mint a két eljárás külön-külön történő használata.

Ezt a következtetést alátámasztja, hogy az ionizált légtisztítás 30 perc alatt képes eltávolítani a levegőben található életképes kórokozók mintegy 80%-át a szoba levegőjéből, az ActivePure által kiváltott fotoxidálás pedig hatástalanítja a maradék levegőben terjedő mikroorganizmus körülbelül 90%-át. A két eljárás kombinációja 30 perc elteltével a teljes aeroszol-behatás mintegy 50-szeres csökkenését eredményezte, ami kb. 98%-os általános inaktíválást/csökkenést jelent.

#### Az értékelésben résztvevő két aktív szennyezőanyag a következő volt:

- 1) B. subtilis bacteria
- 2) MS2 virionok

#### Közzététel:

Jelen kutatási anyagot szakértői értékelést követően az Environmental Science and Technology folyóirat közölte. (2007. január, 606–612.)

**Megjegyzés:**

A tesztelés ellenőrzött környezetben zajlott. A terepi eredmények a környezeti feltételektől függően változhatnak.

Az itt közölt eredményeket az FDA nem értékelte. Ez a termék nem olyan orvostechnikai eszköz, amelynek célja bármely betegség diagnosztizálása, kezelése, megelőzése vagy gyógyítása.

AT\_TD\_CT\_CincinnatiTesting\_0907

# Aeroszol kontaminánsok kontrollálása a beltéri levegőben: A részecskékonzentráció-csökkentés és a mikroorganizmus-hatástalanítás kombinálása

SERGEYA. GRINSHPUN,\*  
ATINADHIKARI, TAKESHIHONDA, †  
KIYOUNKIM, ‡ MIKATOIVOLA, § K. S. R.  
AMCHANDERRAO, † AND TIINAREPO  
NEN

Egészségügyi vonatkozású aeroszol vizsgálatok központja,  
Környezetegészségügyi Intézet, Cincinatti Egyetem, 3223 Eden Avenue, PO  
Box 670056, Cincinatti, Ohio 45267-0056

Az unipoláris ionkibocsátást és a speciális tervezésű RCI-kamrával működő fotokatalitikus oxidációt ötvöző beltéri légtisztítási technikát két tesztkamrában vizsgálták (2,75 m<sup>3</sup> és 24,3 m<sup>3</sup>), nemiológiai és biológiai terhelést jelentő aeroszolok felhasználásával. A részecskékonzentráció csökkenését valós időben és méret alapján szelektálva mértük, és meghatároztuk a Levegőtisztítási tényezőt és a Tiszta levegő szállítási sebességet (CADR). Miközben teszteltük a virionokat és baktériumokat, bioaeroszol mintákat gyűjtöttünk és elemeztünk, és meghatároztuk a mikroorganizmusok túlélési arányát a behatási idő függvényében. Megfigyeltük, hogy az aeroszolkoncentráció ~10-~100-szor gyorsabban csökken, amikor a légtisztító működött, a természetes pusztuláshoz képest. Az adatok arra utalnak, hogy a vizsgált hordozható egységgel, amely ~25 m<sup>3</sup> nem szellőző helyiségben működik, több mint kétszer nagyobb CADR-értékeket lehet elérni, mint a hagyományos zártlancú, 8-as minőségű szűrővel rendelkező HVAC-rendszerrel. A részecskék eltávolítása az unipoláris ionkibocsátás miatt következett be, míg a levegőben levő életképes mikroorganizmusok hatástalanítása a fotokatalitikus oxidációval volt összefüggésbe hozható. Az eredetileg életképes MS2 vírusok körülbelül 90%-a inaktiválódott a 10-60 perces fotokatalitikus oxidáció hatására. Az életképes *B. subtilis* spórák kb. 75%-át sikerült inaktiválni 10 perc alatt, 90%-ot 30 perc elteltével. Felülvizsgálták azokat a biológiai és kémiai mechanizmusokat, amelyek a levegőben terjedő stresszálló vírusok és baktériumspórák inaktiválásához vezettek.

## Bevezetés

A belélegezhető légköri részecskékkel és kórokozókkal való érintkezés különféle egészségügyi problémákat okozhat. Számos technikát fejlesztettek ki a beltéri részecskéknek való kitettség csökkentésére. Az aeroszol részecskék kontrollálása zárt, rosszul szellőző helyiségekben, ahol a szűrővel végzett légcserre rosszul alkalmazható, különleges kihívást jelent.

\* Levelező szerző telefonja: 1-513-558-0504; fax: 1-513-558-2263; e-mail: sergey.grinshpun@uc.edu.

† A Koken Ltd. szabadságosa, Tokio, Japán.

‡ Az Ajou Egyetem tanulmányi szabadságosa, Suwon, Dél-Korea

§ A Nemzeti Közegészségügyi Intézet szabadságosa, Kuopio, Finnország.

† A Karshak Engineering College szabadságosa, Hyderabad, India.

További kihívást jelent a specifikus légköri szennyezőanyagok, például életképes biológiai részecskék beltéri koncentrációjának csökkentése. Míg egyes beltéri légtisztítási technikák kizárólag az aeroszolkoncentráció csökkentésére irányulnak, léteznek olyanok, amelyek az életképes bioaeroszolok (pl. vírusok, baktériumok és gombák) hatástalanítására lettek kifejlesztve.

Néhány kereskedelmi légtisztító túlzottan sok ozont termel (akár elsődleges biocid szerként, akár melléktermékként); így ezek az eszközök közegészségügyi szempontból aggályokra adnak okot(1). Az ozonterhelésre vonatkozó számos irányelv között, a munkahelyi környezetek számára a következő határértékek lettek meghatározva: 0,2 ppm 2 óra időtartam esetében (2), 0,05-0,10 8 óra esetében (2), 0,1 ppm 8 óra esetében (3), és 0,05 ppm azonnali (időkorlát nélküli) kitettség esetén (4). Összehasonlításként, a szabadtérrre vonatkozó standard érték 0,08 ppm 8 órás időtartamra (5). Az ózongenerátorok hatástalaníthatják az életképes mikroorganizmusokat; a hatástalanítás azonban az egészségügyi normákat jelentősen meghaladó koncentrációknál fordul elő (6, 7).

Az UV-sugárzást és a TiO<sub>2</sub>-t fotokatalizátorként alkalmazó fotooxidációt szerves kontaminánsok gázfázisú detoxikációjára (8, 9) és a vízben található mikroorganizmusok inaktiválására alkalmazták. (10-12). Törtétek erőfeszítések zártlancú rendszerben történő alkalmazási lehetőségének feltárására is levégőtisztítás céljából. (13, 14). A kutatók a stresszálló *Serratia marcescens* jelentős mértékű fotokatalitikus inaktiválásáról számoltak be, amely akkor következett be, amikor az aeroszolizált baktériumok viszonylag hosszú ideig keringtek egy TiO<sub>2</sub>-szűrővel felszerelt zártlancú csatornában. Pal és mtsi. (15) hasonló hatást talált az *Escherichia coli*, a *Microbacterium sp.* és a *Bacillus subtilis* kórokozókkal kapcsolatban; Kelleretal (16) a TiO<sub>2</sub>-réteggel bevont fotoreaktoron áthaladó, légköri

*E. coli* nagyfokú inaktiválásáról számolt be. A fotokatalitikus oxidáció biocid hatása a fény hatására létrejövő vegyértéksavlyukaknak, a hidroxilgyököknek, a hidrogén-peroxidnak és más reaktív oxigénfajoknak tulajdonítható. Lin és Li (17) egy kis fotoreaktorban nagyon rövid ideig, másodperces nagyságrendben tesztelték a fotooxidációnak kitett levegőben terjedő baktériumok és gombák életképességének változását. Ilyen rövid idő alatt nem volt megfigyelhető a telepkepző egységek (CFU) számának jelentős csökkenése.

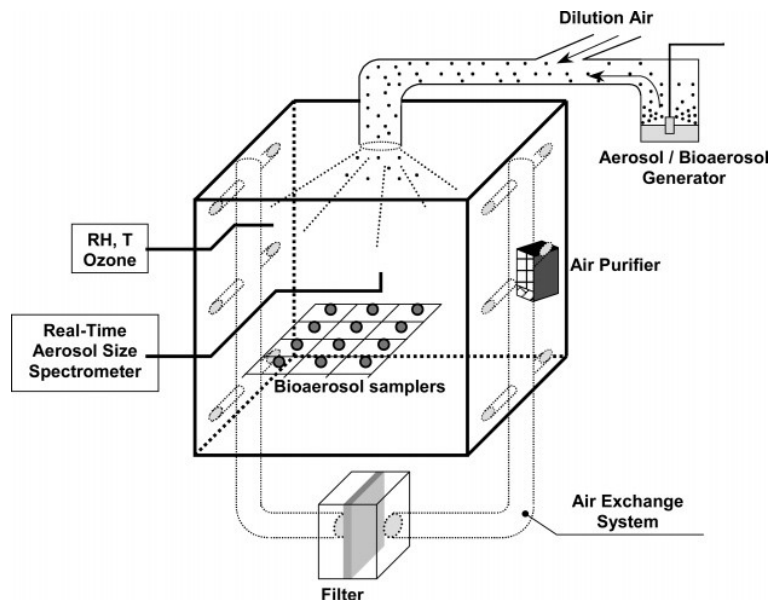
Tudomásunk szerint nem állnak rendelkezésre adatok a hordozható UV/TiO<sub>2</sub>-alapú légtisztítók hatékonyságáról a levegő által terjedő életképes mikroorganizmusok inaktiválására a beltéri környezetben. Ezekre az adatokra ahhoz van szükség, hogy értékelhető legyen a légtisztítás céljából alkalmazott fotokatalitikus oxidáció megvalósíthatósága lakó- és munkahelyi környezetben. Ezenkívül a több légtisztító mechanizmust is alkalmazó hibrid légtisztítók esetében nem áll rendelkezésre elegendő információ a részecskeltávolítási hatékonyság és a biocid képességek megkülönböztetésére, melyek együttes célja a beltéri levegő bioaeroszol-kitettségének csökkentése.

Ebben a vizsgálatban egy új légtisztítási technikát vizsgáltunk, amely különböző aeroszol/bioaeroszol szabályozó eljárásokat ötvöz: az unipoláris ionkibocsátást és a sugárzó katalitikus ionizációt (RCI) technológiáival működő fotokatalitikus oxidációt. Korábban kimutatták, hogy az unipoláris ionemisszió csökkenti a részecskékonzentrációt a beltéri levegőben (18-20), de a hibrid típusú technika hatékonyságáról nem állnak rendelkezésre tudományos adatok.

## Kísérleti rész

A beltéri légtisztító eljárást az 1. ábrán látható kísérleti létesítményben vizsgáltuk. A részecskeltávolítást úgy határoztuk meg, hogy valós időben, méret alapján szelektálva mértük a terhelést jelentő aeroszolok koncentrációját. Az életképes bioaeroszolok vizsgálatakor a mikroorganizmusok túlélési arányát is meghatároztuk. Vizsgálatunkhoz átvettük és a korábbi vizsgálatainkban (18, 19, 21) validált kísérleti protokollokat alkalmaztuk. A kamrában szimultán egy szabadon álló hibrid légtisztító is működött, a kísérleteket a légtisztító kikapcsolásakor hajtották végre.

Jelen közlés tárgya egy jelenleg is folyamatban lévő vizsgálat, mely annak tudatában kerül közlésre, hogy az itt bemutatott eredmények egyelőre nem rendelkeznek megbízható tudományos megalapozottsággal. Az activTek



### 1. ÁBRA A kísérlet menete

A kísérleti aeroszolt folyékony szuszpenzióból állítottuk elő Collison porlasztóval (BGI Inc., Waltham, MA), és a töltést egy 10-mCi Kr<sup>85</sup> töltés-kiegyensúlyozó berendezésen átteresztve egyensúlyoztuk ki. (3M, St. Paul, MN)

Miután összekeveredett a tiszta, meghatározott hőmérsékleten (T = 24-26 C) és 21-30%-os relatív páratartalom (RH) mellett HEPA-szűrővel szűrt levegővel, az aeroszol bekerült a kamrába. Az egyenletes aeroszolkoncentrációs mintázat elérése érdekében alkalmazott 10-15 perces kiigazítási periódust követően megkezdődött a kísérlet (t) 0.

A legtöbb tesztben az aeroszol koncentrációt (C) és a részecskeméret-eloszlást ( $\Delta C / \Delta \log(d)$ , elektromos alacsony nyomású ütközésmérővel (ELPI, TSI Inc./Dekati Ltd, St. Paul, MN) mértük, amely a kaskád impakció elvét alkalmazza, és közvetlen leolvasási képességgel rendelkezik a különböző aerodinamikai méretű részecskék koncentrációjának meghatározására 12 csatornás rendszerben (minden egyes csatorna = ütközési szakasz), 0,041 és 8,4  $\mu\text{m}$  között (középpont). Olyankor, amikor a kísérleteket olyan vírussal fertőzött aeroszollal végeztük, amely az ELPI alsó határértéknél kisebb részecskéket tartalmazott, széles tartományú részecske-spektrométert használtunk (WPS; MSP Inc., Shoreview, MN). A WPS olyan nagy felbontású, valós idejű műszer, amely a differenciál mobilitási elemzést, a kondenzációs részecskeszámítást és a lézeres fényszörást ötvözi a 10 nm és 10  $\mu\text{m}$ -es tartományba eső aeroszol részecskék átmérőjének és számkoncentrációjának mérésére.

Minden mért részecskeméretre (d) az aeroszolkoncentrációt (t) 0 értéknél úgy állítottuk be, hogy körülbelül 100-szorosan túllépje azt a háttérszintet, amelyet a terhelési aeroszol előállítás előtt kaptunk. Először a természetes koncentráció-pusztulást jellemeztük úgy, hogy rögzítettük  $C_{\text{természetes}}(d, t)$ -t 10 másodpercenként az ELPI-vel és 2,5 percenként a WPS-szel. Ezt követően létrehoztuk a teszt-aeroszolt, majd ismét összekevertük a kamrában, hogy elérjük ugyanazt a kiindulási koncentrációs szintet. t) 0 hőmérsékleten bekapcsoltuk a légtisztítót, és monitoroztuk a  $C_{\text{AP}}(d, t)$  koncentrációt 120 percen keresztül (vagy addig, amíg a részecskeszám a kimutathatósági határ alá csökkent). A kizárólag a légtisztító hatására létrejövő részecskeeltávolítás hatékonyságának számszerűsítéséhez a levegőtisztítási tényezőt (ACF) méret alapján szelektálva határoztuk meg az idő függvényében:

$$\text{ACF}(d, t) = \frac{C_{\text{natural}}(d, t)}{C_{\text{AP}}(d, t)} \quad (1)$$

Jelen közlés tárgya egy jelenleg is folyamatban lévő vizsgálat, mely annak tudatában kerül közlésre, hogy az itt bemutatott eredmények egyelőre nem rendelkeznek megbízható tudományos megalapozottsággal. Az activTEK

Ezenkívül, a teljes részecskeeltávolítási sebességet 1-nek számoltuk.

$$\lambda(d, t) = \frac{1}{t} \ln \left[ \frac{C(d, t=0)}{C(d, t)} \right] \quad (2)$$

és a részecskeeltávolítási sebességet (kizárólag a légtisztító miatt) az elsőrendű kinetikát követve határoztuk meg, mint

$$\text{PRR}(d, t) = \frac{1}{t} \ln \left[ \frac{C_{\text{AP}}(d, t=0)}{C_{\text{AP}}(d, t)} \right] - \frac{1}{t} \ln \left[ \frac{C_{\text{natural}}(d, t=0)}{C_{\text{natural}}(d, t)} \right] \quad (3)$$

CAP esetében ( $d, t$  0)  $C_{\text{natural}}(d, t)$  0),

$$\text{PRR}(d, t) \approx t \ln[\text{ACF}(d, t)] \quad (4)$$

Erre a tiszta levegő szállítási sebességének (CADR) meghatározása miatt volt szükség, amelyet az ANSI/AHAM (Amerikai Nemzeti Szabványügyi Intézet/Háztartási készülékgyártók Szövetsége) szabványai szerint így határozható meg:

$$\text{CADR}(d, t) = V \times \text{PRR}(d, t) \text{ [m}^3/\text{h]} \quad (5)$$

A CADR fogalma lehetővé teszi egy szabadon álló légtisztító és egy zártláncú szellőző/levegőszűrő rendszer légtisztítási hatékonyságának légtérfogatban történő összehasonlítását. (V; figyelembe kell venni, hogy a PRR a Vfüggvénye).

A részecskék légtisztítóval történő eltávolításának vizsgálatára két nembiológiai teszt-aeroszolt alkalmaztak, a NaCl-ot és a füstöt. A keletkezett részecskék elsősorban a 0,02–2,0  $\mu\text{m}$  tartományba estek, ami ultrafinom és finom részecskeszemcséket tartalmaz, és az ismert vírusok és baktériumok nagy részére jellemző. Az MS2 vírus és a *Bacillus subtilis* bakteriális spórák voltak a fő biológiai provokációs aeroszolak. *Válogatott teszteléseket folytattunk a Pseudomonas fluorescens* baktériummal is.

Az MS2 bakteriofágot, ami egy 27 nm-es, burok nélküli icozaéderes RNS-kolífág és viszonylag stabil a környezeti stresszel szemben, a múltban a legtöbb emlősvírus szimulánsként használták, és az enterovírusok indikátoraként ismert. (22-26). Az MS2 vírus törzs-szuszpenziója úgy készült,

hogy 9 ml Luria-Bertani folyékony táptalajt adtunk fagyasztva-szárított fág ampullához (ATCC 15597-B1).

VOL. 41, NO. 2, 2007 / ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY 607

**Jelen közlés tárgya egy jelenleg is folyamatban lévő vizsgálat, mely annak tudatában kerül közlésre, hogy az itt bemutatott eredmények egyelőre nem rendelkeznek megbízható tudományos megalapozottsággal. Az activTek**

Ezt a szuszpenziót szűrtük 0,2 µm-es porozitású membránszűrővel, és sorozatosan hígítottuk úgy, hogy a porlasztó-szuszpenzió 108-109 PFU/ml-t tartalmazzon. (PFU) plakk-képző egység). Az MS2 fág-titert Adams módosított plakkvizsgálati protokollja szerint határoztuk meg (27); befogadó szervezetként *Escherichia coli*-t használtunk(ATCC 15597, C3000 törzs).

A *B. subtilis* egy grampozitív spóráképző baktérium, amelynek magja körülbelül 0,7-0,8 µm-in szélességű és 1,5-1,8 µm hosszú. A *B. subtilis* spórákat korábbi laboratóriumi vizsgálatok során környezettel szemben ellenálló, patogén baktériumok (29-31) helyettesítőjeként alkalmazták. A *B. subtilis* fagyasztva-száritott baktériumspóráit (beszerzés helye: Amerikai hadsereg, Edgewood Laboratories, Aberdeen Proving Ground, Maryland) aktiváltuk 55-60 °C-on 25 percig, majd kétszer átmostuk steril, ioncserélt vízzel történő vortexeléssel, majd 7 percig szobahőmérsékleten centrifugáltuk 7000 percmintás fordulatszámra (rpm).° A szuszpenzióban lévő össz baktériumkoncentrációt hemacitóméterrel 108-109 / ml-re állítottuk be. Az életképes baktériumok számlálását trippászója agar (TSA) táptalajon 30 ° C-on történő 18 órás tenyésztéssel végeztük, az életképes (tenyészhető) koncentráció a porlasztó-szuszpenzióban ugyanolyan nagyságrendű volt, mint az összkoncentráció, azaz 108-109 CFU/ml (CFU) telepkező egység). A *P. fluorescens* baktériumok (amelyeket a kiválasztott tesztekben használtak) viszonylag érzékenyek a környezeti stresszre. Az aeroszolisztást megelőzően a *P. fluorescens* (ATCC 13525) vegetatív sejtjeit triptikáz szója táplélesben tenyésztettük 28 °C-on 18 órán át, és a *B. subtilis* spórákhoz hasonlóan mostuk át.

A biológiai részecskék vizsgálata során a levegőmintákat zselatinszűrőkkel (SKC Inc.) felszerelt gombos aeroszol mintavevővel („Button Sampler”, SKC Inc., Eighty Four, PA) (SKC Inc.) gyűjtöttük, és 4 liter/perc áramlási sebességen kezeltük 5 percig. Nyolc gombos mintavevőt alkalmaztunk minden tesztben, egy vakmintát és egy háttérmentát is generáltunk, három mintát  $t = 0$  vettünk le, a másik három pedig meghatározott időintervallumban. Négy időintervallumot teszteltünk:  $t = 10, 15, 30$  és  $60$  perc. További kiválasztott kísérleteket végeztünk BioSampler (SKC Inc. Eighty Four, PA) alkalmazásával a *P. fluorescens* és a *B. subtilis* gyűjtésére. A BioSampler hatékonyan gyűjti össze az életképes baktériumokat (29), míg a folyékony tápöreg minimalizálja a kiszáradási stressz esélyét. Mivel vágási mérete túl nagy ahhoz, hogy hatékonyan mintavételezze a kis MS2 virionokat, a BioSamplert nem alkalmaztuk a zselatinszűrők alternatívájaként az MS2 vírus gyűjtésére.

A mintákat elemeztük az életképes, levegőben lévő virionok (PFU) és baktériumok (CFU) szempontjából, hogy meghatározzuk a hosszabb távon túlélők százalékos arányát. (t). Az eredményeket a légtisztító működtetésével és anélkül is néztük. Előzetes tesztjeink azt mutatták, hogy a légtisztító működtetése az ionkibocsátás miatt jelentősen csökkenti a kamra össz bioaeroszol-koncentrációját. Ezért az ionkibocsátót ideiglenesen zárolták a hibrid egységben a vírus és baktérium inaktiválásának tesztelésékor, hogy biztosítható legyen a kellő számú mikroorganizmus az életképes szám meghatározásához a teszt végén.

200 µl oldott zselatin szűrő kivonat alikvot részét alkalmaztuk a plakk vizsgálatához ahhoz, hogy meghatározzuk a levegőben lévő aktív (életképes) virionok számát. (PFU/cm<sup>3</sup>). Ehhez hasonlóan, az extraktumot TSA lemezekben tenyésztettük, hogy megkapjuk az életképes baktériumok koncentrációját a levegőben. (CFU/cm<sup>3</sup>).

További teszteléseket indítottunk annak megvizsgálására, hogy a légtisztító biocid hatása valóban az aeroszol fázisban történ-e (és nem a mikroorganizmusok felhalmozódása után a szűrőn). Erre a célra aeroszolos mikroorganizmusokat gyűjtöttünk össze nyolc zselatinszűrőn 5 perces időtartamig a légtisztító nélküli kamrában. Négyet a szűrők közül közvetlenül a teszt után megvizsgáltunk életképes mikroorganizmusokat keresve, míg a másik négy szűrőt 10, 15, 30 és 60 percig kezeltünk a kamrában a légtisztítóval, s csak ezután elemeztük őket. A két mintakészlet összehasonlítása lehetővé tette annak megvizsgálását, hogy a mikroorganizmusok hatástalanítása a szűrőkön a gyűjtési folyamat során történt-e.

608 • ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY / VOL. 41, NO. 2, 2007

Az ózonszintet és a levegő ionkoncentrációját valós időben követvük nyomon a kamrában ózonmonitor (PCI Ozone & Control Systems, Inc., West Caldwell, NJ), illetve levegőion-számláló (AlphaLab Inc., Salt Lake City, UT) segítségével. A tesztkamrában a levegő hőmérséklete  $24 \pm 2^\circ\text{C}$ , a relatív páratartalom pedig  $22 \pm 2\%$  és  $28 \pm 2\%$  között változott termohigrométerrel mérve. (Fischer Scientific Co., Pittsburgh, PA).

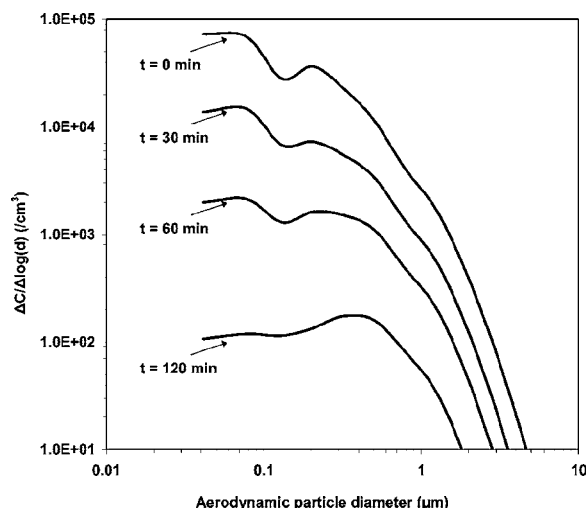
A vizsgálatban használt légtisztító-prototípus (Ecoquest International Inc., Greeneville, TN) ionkibocsátót és egy speciálisan kialakított RCI-kamrát alkalmazott. Az előző negatív ionokat termel a beltéri levegőben, és az aeroszol részecskék onnan veszik fel azokat. Fontos megjegyezni, hogy ez a módszer különbözik a légtisztításnak azon fajtájától, melyben a légtisztító a részecskéket a bejáratánál tölti fel, majd elektrosztatikus kicsapattal gyűjti össze őket a fémlektrodákon. Az RCI-kamra áramlásra optimalizált célstruktúrával rendelkezik, amely hosszúkás cső alakú elemek mátrixait tartalmazza polikarbonátból és párhuzamos irányban van elrendezve a széles spektrumú UV fényforrás szemközti oldalain, vagy alternatív módon, annak négy oldalán. Az UV-lámpa argongázt használ, higany- és karbidiszálakkal, 100 és 367 nm közötti spektrális teljesítménnyel. Ezenkívül a kamra célszerkezete hidrofíli tulajdonságokkal rendelkező bevonattal volt ellátva, amely a következő anyagcsoportokat tartalmazza: titán-dioxid, ródium, ezüst és réz. Ennek eredményeként a fotokatalitikus oxidáció által reaktív anyagok képződnek, olyanok mint a hidroxilgyökök, a vegyértéksáv lyukak, a szuperoxid-ionok és a hidrogén-peroxidok.

A teszteket két beltéri tesztkamrában végeztük, köztük egy nagyméretű, bejárható kamrával (24,3 m<sup>3</sup>), amely egy lakóhelyiséget szimulált, és egy kisebb kamrával (2,75 m<sup>3</sup>), amely zárt helyet szimulált. (pl. fürdőszoba, kisebb irodaterület vagy autó beltéré). A részecskeeltávolítást mindkét kamrában vizsgálták, míg a bioaeroszol életképességi vizsgálatokat a kisebb, rozsdamentes acélból készült kamrában végezték, amely alkalmas volt a biológiai dekontaminációra. A légtisztítót nem szellőző, légcseré nélküli kamrákban tesztelték, mivel közismert, hogy a hordozható légtisztítók alkalmazása elsősorban rosszul szellőző helyiségekben előnyös. (20, 21). A légcserét csak akkor indították el, amikor a HVAC-szűrővel ellátott zártláncú szellőző/légszűrő rendszert tesztelték, hogy összehasonlítsák annak teljesítményét a hordozható légtisztítóval a CADR, a Tiszta levegő szállítási arány szempontjából. A szellőző/légszűrő rendszert abból a célból is telepítették, hogy a tesztkamrát megtisztítsa az egymást követő kísérletek közt. Majdnem mindegyik tesztben a légtisztító berendezés a kamra sarkában, a kamra közepével szemben működött. Külön kísérletet végeztek annak megvizsgálására, hogy a légtisztító helye és tájolása befolyásolja-e az ACF-et (levegőtisztítási tényezőt).

## Eredmények és Kifejtés

**A részecskék eltávolítása a levegőből.** A 2. ábra a NaCl aeroszol koncentrációjának és részecskeméret-eloszlásának alakulását mutatja akkor, amikor a légtisztító a nagy tesztkamrában működött. Ebből a példából látható, hogy a 0,1 µm-es részecskék aeroszol koncentrációja 1 óra alatt 28-szoros, 2 óra alatt körülbelül 250-szeresére csökkent; míg az 1 µm-es részecskék ennek megfelelő csökkenése körülbelül 10-50-szeres volt. Füst részecskékkel végzett vizsgálat során az aeroszolkoncentráció még gyorsabban csökkent. Az aeroszolkoncentráció csökkentésének fenti szintjei lényegesen nagyobbak, mint azok a szintek, amelyeket nyugodt vagy kevert természetes pusztulási modellek jósoltak. (32). Ezt az eredményt akkor kaptuk, amikor a levegő ionkibocsátó berendezés és az RCI-kamra szimultán működtek az egységben. Érdekes módon, statisztikailag ugyanaz a részecske-csökkentő hatás ( $p > 0,5$ ) volt megfigyelhető akkor, amikor az RCI-kamrát kikapcsolták, és csak az ion-emitter működött. Ez utóbbi megállapítás bizonyítja, hogy a részecske-eltávolítás az unipoláris ionkibocsátás hatására történt, és nem a fotokatalitikus reakciók miatt.

**Jelen közlés tárgya egy jelenleg is folyamatban lévő vizsgálat, mely annak tudatában kerül közlésre, hogy az itt bemutatott eredmények egyelőre nem rendelkeznek megbízható tudományos megalapozottsággal. Az activTek**



2. ÁBRA A NaCl aeroszol részecskék koncentrációja és méreteloszlása az ELPI-vel mérve a 24,3 m<sup>3</sup> kamrában úgy, hogy a légtisztító a kamra közepe felé néz, 1,7 m-re a mérési ponttól. A kamrában nincs szellőztetés. A kiindulási összeraeroszol koncentráció  $1,50 \times 10^5$ /cm<sup>3</sup>.

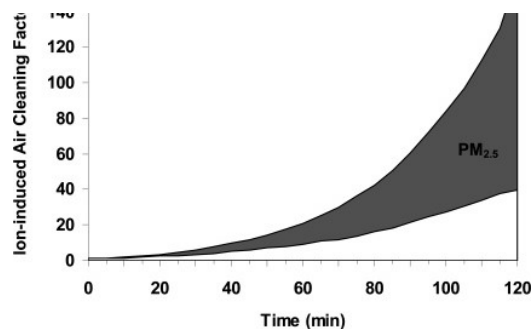
Ez a megállapítás megegyezik az unipoláris levegőionizációnak a levegőkoncentrációra gyakorolt hatásáról korábban közzétett adatokkal. (18-21). A levegőtisztítás különösen hatékony magasabb kezdeti aeroszolkoncentrációknál (>10<sup>4</sup> részecske/cm<sup>3</sup>), amelyek biztosítják a levegőionok és az aeroszolrészecskék közötti megfelelő kölcsönhatást. Mint azt már említettük, nem szellőző környezetben a hatás jóval hangsúlyosabb lesz, mint szellőző környezetben.

Különösen magas volt az aeroszol csökkenést a de 0,3 µm részecskéknél. Például, amikor a ~10<sup>4</sup> e/mp ionleadással rendelkező légtisztító folyamatosan működött a 24,3 m<sup>3</sup> kamra egyik sarkában, a kamra közepével szemben 2 órás időtartammal, az ACF elérte a ~30-70 értéket a d = 0,08-0,3 µm és a ~30-16 értéket a d = 0,08-2 esetében. (provokációs aeroszolokként NaCl-al és füsttel végzett tesztekkel).

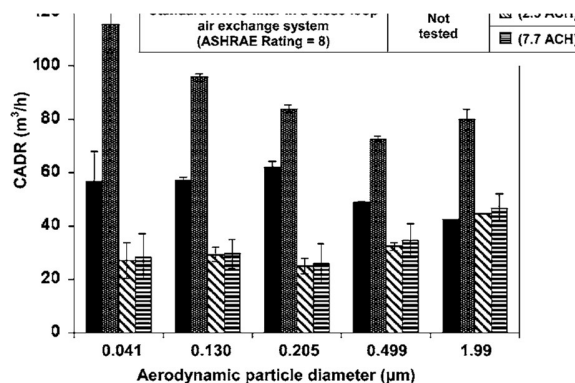
Ugyanez az ACF szint gyorsabban érhető el kisebb térfogatú beltéri környezetben, míg nagyobb helyiségekben lassabban. A kísérleti irányvonalak egyetértenek az ionindukált aeroszol eltávolítást alkalmazó modellel (20).

Megállapították, hogy az ACF nemcsak a működési időtől és a szemcsemérettől függ, hanem a légtisztító helyétől/tájolásától is a kamrán belül. Így például, a szoba közepe felé néző sarokhelyzet előnyösebbnek bizonyult, mint a fal felé néző irány. A közép- és a sarok helyzetben kimutatható ACF-eredmények különbsége szignifikáns volt, és a működési idővel nőtt. A 3. ábrán látható árnyékolt terület az ionindukált levegőtisztítási tényezőt mutatja be, ahol a részecskék méret alapján szelektált adatait egyesítették a NaCl részecskékre mért méretekkel 2,5 µm -ig, és kiszámították a 24,3-m<sup>3</sup>-es kamra három kiválasztott helyére/tájolására mért átlagértéket: a középpont felé néző sarokra, középre és 80 cm-re a faltól, azzal szemben.

A 4. ábra demonstrálja a tesztelt légtisztító működtetésével elért CADR-értékeket öt kiválasztott méretű, aeroszol szennyező anyagként működő NaCl- és füst részecskére a nem szellőző 24,3 m<sup>3</sup> -es kamrában. A CADR körülbelül 42,1±0,1 és 62,1±1,8 m<sup>3</sup>/h közti tartományban van (a d = 0,04-1,99 µm NaCl-részecskék esetén) és 72,4 ± 0,9 és 115,5 ± 10,8 m<sup>3</sup>/h közti tartományban van azonos mérettartományú füst részecskék esetén. A különbség annak tulajdonítható, hogy a NaCl- és a füst részecskék különböző mértékben képesek elektromos töltést felvenni a levegő ionjaiból, ami eltérő mobilitást és ezért eltérő migrációs sebességet eredményez számukra. A fenti magyarázat helytállóknak tűnik, mivel mint kiderült, az unipoláris ionkibocsátás az a fő mechanizmus, amely az aeroszolrészecskék koncentrációjának csökkenését okozza.



3. ÁBRA Az ionindukált levegőtisztítási tényező (ACF) a PM<sub>2,5</sub> NaCl esetében, Elektromos kisnyomású Impaktor-ral (ELPI) mérve és a légtisztító különböző helyeire és irányaira integrálva a 24,3 m<sup>3</sup> kamrában. A kamrában nincs szellőztetés. A kiindulási PM<sub>2,5</sub> aeroszol koncentráció  $(0,356-1,50) \times 10^5$ /cm<sup>3</sup>.



4. ÁBRA Tiszta levegő szállítási sebesség (CADR), a NaCl- és a füst aeroszolokra meghatározva, ELPI-vel mérve a nem szellőző 24,3 m<sup>3</sup>-es kamrában. A légtisztító teljesítményének összehasonlítása a kamra zártlancú légcserélő rendszerébe beépített standard HVAC szűrő teljesítményével. (8.-as ASHRAE besorolás).

Ezenkívül a 4. ábra bemutatja az ASHRAE szabvány szerint 8. besorolású HVAC szűrővel felszerelt zártlancú légcserélő rendszerrel kapott CADR-értékeket, két légcserélő sebesség mellett. (2,5 és 7,7 ACH). Az adatok azt sugallják, hogy a vizsgált hordozható légtisztító, amely egy körülbelül 25 m<sup>3</sup>-es nem szellőző helyiségben működik, több mint kétszer nagyobb CADR-t képes biztosítani, mint a hagyományos, 8-as besorolású központi HVAC rendszer. Nyilvánvaló, hogy a hatékonyabb részecskeszűrők gyorsabban csökkentik az aeroszolos szennyeződések mennyiségét és jobb teljesítményre képesek, mint a vizsgált légtisztító. Például a hordozható egységhez képest a 24,3 m<sup>3</sup>-es kamra zártlancú légcserélő rendszerébe telepített HEPA szűrő hozzávetőlegesen 4 és 3-szor nagyobb CADR-t eredményezett 2,5, illetve 7,7 ACH mellett, amikor a provokációs aeroszol NaCl-részecskékből állt, és 2,2 és 1,4-szer nagyobb füst részecskékből álló provokáció esetén. A HEPA szűrőket azonban lakossági központi HVAC rendszerekben ritkán használják a magas nyomásesés és a teljesítményükre gyakorolt terhelés miatt. A hibrid légtisztítási technikával a beltéri levegő részecskéinek eltávolítását a kisebb (2,75 m<sup>3</sup>) kamrában is megvizsgáltuk, amelyet egyébként elsősorban az életképes mikroorganizmusok hatástalanításának értékelésére használtunk fel. A WPS-mérésekből MS2 virionokkal kapott CADR-értékek 73 (5 m<sup>3</sup>/h) voltak, ami a nagy kamrában jelenlévő NaCl- és füst részecskék vírusrétegeihez kapott CADR-tartományba esik.

**1. TÁBLÁZAT A tartós ideig t életben maradó, levegőben található mikroorganizmusok százaléka az olyan 2,75 m<sup>3</sup>-es kamrában, amelyben RCI működött, a plakkképző egységek (PFU) alapján (MS2 vírus esetén) vagy a telepképző egységek (CFU) alapján mérve (Bacillus subtilis Endospores esetén).**

a levegőben lévő túlélő mikroorganizmusok százalékos aránya (átlag ± SD) légtisztítóval üzemelő kamrában t idő alatt. behatási idő, t (perc)

	MS2 vírus, [PFU/cm <sup>3</sup> ]/[PFU/cm <sup>3</sup> ] <sub>t=0</sub>	Bacillus subtilis endospórák, [CFU/cm <sup>3</sup> ]/[CFU/cm <sup>3</sup> ] <sub>t=0</sub>
10	9,3 (2,0 (n) 5)	24,1 (3,7 (n) 2)
15	9,2 (4,3 (n) 12)	15,7 (1,7 (n) 3)
30	8,3 (1,1 (n) 8)	7,9 (1,1 (n) 3)
60	10,3 (1,7 (n) 5)	10,1 (1,3 (n) 3)

Bioaeroszol-mintavételt végeztünk zselatinszűrővel ellátott gombos mintavevővel. n ) ismétlések száma.

Ez arra utal, hogy a nem biológiai részecskék felhasználhatók azonos mérettartományú biorészecskék ionindukált aeroszol csökkentésének meghatározására. Ez a megállapítás azt is magában foglalja, hogy legalábbis az MS2 virionokat képviselő részecskeméret-tartományban, a beltéri levegőben az ionkibocsátás miatt a PRR fordítottan arányos a levegő térfogatával [lásd az 5. egyenletet].

**Ózon** Mindkét (nem szellőző) tesztkamrában, az ózonkoncentráció fokozatosan nőtt, mivel a légtisztító folyamatosan működött. A 24,3-m<sup>3</sup> kamrában 0,006-ról 0,05 ppm-re nőtt mintegy 35 perc alatt, míg a kisebb (2,75-m<sup>3</sup>) kamrában ugyanez a növekedés körülbelül 5 perc alatt következett be. Miután azonban elindították a légszűrőt (1 ACH-t nem meghaladó), az ózonkoncentráció a 24,3-m<sup>3</sup> kamrában nem mutatott szignifikáns növekedést a kezdeti szinthez képest. (p > 0,05). Az egyik nem szellőző -100m<sup>3</sup>-es, itt nem szereplő helyiségben működő vizsgált egységgel kapott ellenőrzési adataink arra utalnak, hogy az ózonszint 0,05 ppm alatt tartható az egység több órán át tartó folyamatos működése mellett.

Léteznek olyan - ionkibocsátást és nagyobb mértékben a fotokatalitikus oxidációt alkalmazó - légtisztítók, amelyek nagyobb fokú beltéri ózonkoncentráció növekedést okozhatnak, mint az itt vizsgált eszköz. Az ilyen eszközök használata zárt lakott légterekben előfordulhat, hogy nem megfelelő, mivel folyamatos működésük túl magas ózonszinthez vezethet, és bizonyos kémiai vegyületek jelenlétében nanorészecskéket hozhat létre. (33 ). Bár az unipoláris ionkibocsátás képes elnyomni ezt a hatást, fontosnak tűnik az ózonszintet a létező küszöbérték alatt tartani. Úgy gondoljuk, hogy a megoldás a folyamatos rendszer alternatívájaként, egy szakaszos rendszer alkalmazásában rejlik, amely addig engedi a légtisztító működését, amíg az ózon el nem ér egy bizonyos szintet. Ezt követően az ózongeneráló elem automatikusan kikapcsol, és amint az ózonkoncentráció csökken, a ciklus újra megismételhető.

**Mikrobák inaktiválása** Az 1. táblázat összefoglalja a mikrobák inaktiválásának eredményeit. Az eredetileg életképes MS2 vírusok körülbelül csak 10%-a maradt életben a légtisztító 10-60 perces behatását követően a kamrában és mintegy 90% hatástalanítva lett. Amikor az aeroszolos MS2 természetes koncentrációban végbemenő pusztulását vizsgáltuk a kamrában (miközben a légtisztító nem működött), azt tapasztaltuk, hogy az aktív vírusok koncentrációja viszonylag stabil volt: a csökkenés 1 óra alatt nem haladta meg a 20,3 (0,9%-ot). Az adatok arra utalnak, hogy a vírus hatástalanítása meglehetősen gyorsan megy végbe, mivel a túlélő virionok százalékos aránya nem függ a behatási időtől, t=10-60 perc esetében. Így egy viszonylag rövid idő elegendő lehet ahhoz, hogy 10-szeresére csökkenjen az életképes vírusok százaléka a légtömegben, míg a túlélő kórokozók nagyfokú rezisztenciát mutattak a folyamatos stresszel szemben. Amikor az aeroszolizált virionokat fotokatalitikus oxidációnak teszteltük ki, a hidroxilgyökök befolyásolhatják a fehérje kapszidburkolatát és a kötési helyeket, ezáltal meggátolva a vírus későbbi kölcsönhatását a gazdával, valamint a plakk-képző egységek képződését. (34). Ezenkívül a TiO<sub>2</sub> fotokatalitikus sejt oxidatív

károsodást okozhat a vírus kapszidjában (35), és a gyökök megváltoztathatják a vírus genetikai anyagát. (36, 37). Eredményeink azt sugallják, hogy a figyelemre méltó vírus-hatástalanítási arány eléréséhez, a hibrid légtisztító alkalmazható vagy folyamatosan, rövid időintervallumokra, vagy szakaszos rendszerben. Másrészt vélhető, hogy a légtisztító hosszan tartó működése olyan környezetekben előnyös, ahol folyamatos a „friss” aktív virion-utánpótlás.

A levegőben lévő *B. subtilis* spórák mintegy 75%-a inaktiválódott a légtisztító behatására az első 10 percen, 85% az első 15 percen, és kb. 90% vagy több 30 perc elteltével. (1. táblázat). 30 és 60 perc közti behatásra nem figyeltünk meg jelentős csökkenést a túlélő spórák számában (hasonlóan a virionoknál tapasztalt tendenciához), ami a hatás nemlineáris voltára utal. A tenyészthető mikroorganizmusok természetes pusztulása nem volt szignifikáns (p > 0,05) 1 óra időtartamra, a zselatinszűrőkkel ellátott gombmintavevőkkel mérve. Az ezen ellenőrző vizsgálatok során kapott adatok szórása azonban elérte az 58%-ot, és a szűrőkből származó telepképző egységek száma megközelítette a kimutatási határértéket. Ennek a kérdésnek a kezelésére, megmértük az életképes *B. subtilis* spórák természetes bomlását a BioSampler-rel t) 0 és t ) 2 óra időtartamra. Megerősítést nyert, hogy az életképesség körülbelül (20%-on belül állandó volt a légtisztító hiányában.

A baktériumoknál a reaktív hidroxilgyökök által történő inaktiválási folyamat öt reakcióút mentén haladhat:

- A koenzim A oxidációja, ami a sejtlégzés gátlását és sejthalált okoz (38);
- a baktériumsejtek külső membránjának pusztulása (12);
- a telítetlen foszfolipid oxidációja a baktérium sejtmembránjában (39);
- A sejtközi K<sup>+</sup> ionok szivárgása (11); és
- A DNS-re és az RNS-re mért káros hatások (36, 37).

Az egyik oka annak, hogy a *B. subtilis* endospórák hatástalanítása időfüggő volt, peptidoglikánokat tartalmazó, vastag membránrétegükben rejlik. Ez összhangban áll a Matsunaga és mtsai. (40) által közöl vizsgálatával, melyben megállapították, hogy a koenzim A TiO<sub>2</sub> fotokatalizátor általi fotooxidációja nem volt teljesen hatékony a vízben lévő *Chlorella vulgaris* algákkal szemben, vastagabb sejtfaluk miatt. A baktériumok néhány más önvédelmi mechanizmusa az oxidációs stressz ellen, beleértve a szuperoxid-diszmutáz enzimek szintézisét, szintén lelassíthatja az inaktivációs folyamatot. (41).

Bár az idő tényezőnek bizonyult a baktériumspórák inaktiválásában, az életképesség csökkenése viszonylag gyorsan bekövetkezett mind az MS2 vírus, mind a *B. subtilis* esetében. Ez a vegyértéksávbán lévő lyukak (h<sup>+</sup>) (TiO<sub>2</sub> + hv - h<sup>+</sup> + e<sup>-</sup>) gyors kölcsönhatásának tulajdonítható a vírusok és baktériumok külső falában vagy membránjában található szerves anyagokkal. A fent említett kölcsönhatás valószínűleg azelőtt következik be, mielőtt jelentős mennyiségű hidroxilgyök (OH) képződne a légtömegben. Bár korábbi vizsgálatok (11, 12) hangsúlyozták a hidroxilgyökök (H<sub>2</sub>O + h<sup>+</sup> f · OH + H<sup>+</sup>) szerepét, ezek a gyökök nem szerepelhetnek, mint elsődleges tényező a mikrobiális inaktivációban, különösen a levegőben lévő kórokozók esetén. Továbbá, mivel kísérleteinket viszonylag száraz levegőn végeztük (RH < 30%), a vízmolekulák nem voltak túlsúlyban a katalizátorral érintkező fajok közt, és így a hidroxilgyökök szerepe valószínűleg sokkal alacsonyabb volt, mint a folyadékokban. Shang és mtsai. (9) arra a következtetésre jutottak, hogy a gázfázisban az olyan szerves vegyületek, mint például a heptán, könnyen kölcsönhatásba léphetnek a fotogenerált lyukakkal, miközben a vízgőz molekulákkal való kölcsönhatás jóval kevésbé hangsúlyos. Alberici és Jardim (8)

**Jelen közlés tárgya egy jelenleg is folyamatban lévő vizsgálat, mely annak tudatában kerül közlésre, hogy az itt bemutatott eredmények egyelőre nem rendelkeznek megbízható tudományos megalapozottsággal. Az activTek**



arról számoltak be, hogy a TiO<sub>2</sub> fotooxidáció során keletkező vegyértéksáv lyukak képesek bármilyen szerves vegyület oxidációjára. A folyamatsorán hidrogén-peroxid is termelődik

(O<sub>2</sub> + e<sup>-</sup> → O<sub>2</sub><sup>•-</sup>; O<sub>2</sub><sup>•-</sup> + H<sup>+</sup> → HO<sub>2</sub><sup>•</sup>; 2HO<sub>2</sub><sup>•</sup> → O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), amely képes szabadon behatolni a sejtmembránba és a sejtfalba, és mikrobiális inaktivációt okozhat

(42). A gázfázisú  $\text{TiO}_2$  oxidáció levegőben lévő mikroorganizmusokra gyakorolt szerepére vonatkozó további biokémiai vizsgálatok, csakúgy, mint az aeroszol fázis reakciókinetikájának vizsgálata miatt indokoltnak tűnik a fenti értelmezések továbbgondolása.

A *P. fluorescens* szelével végzett kísérletek kimutatták, hogy a telepkepző egységek száma a tesztmintákban és a kontrollmintákban is a kimutatási határ alatt van. A *B. subtilis* endospórákkal ellentétben, a környezeti levegővel való akár nagyon rövid érintkezés is (RH < 30%) jelentősen csökkentette az aeroszolizált *P. fluorescens* közismerten stresszérzékeny vegetatív sejtjeinek az életképességét. Talán a kiszáradási stresszre érzékeny mikroorganizmusok jobban használhatók az ilyen típusú vizsgálatokhoz, ha a tesztet magasabb relatív páratartalom mellett végzik.

További kontrollkísérleteket végeztünk annak kivizsgálására, hogy az MS2 vírus és a *B. subtilis* spórák esetében talált életképesség-csökkenés az aeroszol fázisban vagy a mintavevő szűrőn jött létre. Az MS2 esetében azt találtuk, hogy 1835 (270 PFU/ml és 1855 (325 PFU/ml akkor képződött, amikor a szűrővizsgálatokat a behatásnak nem kitett (nem exponált), illetve a 60 perces behatásnak kitett szűrőkből tenyésztettük. A *B. subtilis* esetében 1770 (275 CFU/ml) és 1125 (410 CFU/ml) volt megfigyelhető a nem exponált, illetve a 60 perces behatásnak kitett szűrőknél. Sem a vírus, sem a baktérium életképességében nem történt jelentős változás a nem aeroszol jellegű expozíció következtében ( $p > 0.05$ ). Így ezek a megállapítások megerősítik, hogy a tesztjeink során megfigyelt vírus- és baktérium-inaktiváció valóban az aeroszol fázisban történt, és nem volt összefüggésbe hozható a szűrőkön végbemenő inaktíválódással.

**Együttes hatás (Minta-kalkulációk).** Megállapítottuk, hogy a részecskék eltávolítása kizárólag az unipoláris ionkibocsátás miatt történt, míg a levegőben lévő életképes MS2 virionok és *B. subtilis* spórák inaktíválása az RCI-kamra által generált fotokatalitikus reakció következtében jött létre. A hibrid típusú légtisztító által ötvözött és szimultán működő két mechanizmus jelentősen csökkentheti a már meglévő életképes aeroszol szennyezőanyagoknak való kitettség mértékét beltéri környezetben. Az RCI-kamra által termelt ózon vélhetően nem okoz jelentős mikrobapusztulást, mivel nem volt megfelelő szintű. Tseng és Li (43) a 3,43 ppm-et jelölték meg a megfelelő szintnek a levegőben terjedő MS2 vírussal kapcsolatban, Li és Wang (44) pedig kimutatták, hogy akár 20 ppm  $\text{O}_3$ -szintig nem figyelhető meg a levegőben lévő *B. subtilis* spórák inaktíválódása.

A következő becslést a jelen vizsgálat során kapott kísérleti adatok alapján készítettük. Feltételezve, hogy az ionindukált légtisztítás a levegőben lévő életképes kórokozók mintegy 80%-át eltávolítja a szoba levegőjéből 30 perc alatt, valamint, hogy az RCI által kiváltott fotooxidáció után a levegőben fennmaradó mikroorganizmusok csak 10%-a marad életképes, az életképes kórokozónak való össz aeroszol-kitettség a szobában 30 perc elteltével körülbelül 50-szeresére csökken.

A mikroorganizmusok megfigyelt gyors hatástalanítása szükségelenné teszi az RCI-kamra folyamatos működtetését. Az adatok azt sugallják, hogy a kamra használható „részidősen” 10-30 percig és kb. 1-2 órás „pihentetéssel”, amíg a háttér ózonszint el nem éri a határértéket (a fentiekben javasolt szakaszos rendszerként használva), miközben az ionkibocsátás folyamatosan futtatható az aeroszolkoncentráció csökkentésének elérésére.

## Köszönetnyilvánítás

A vizsgálat részben az EcoQuest International támogatásával zajlott. Dr. K.Y. Kim részvételét részben a Koreai Research Foundation Postdoctoral Fellowship Program finanszírozta. (Posztdoktori Ösztöndíj Program Kutatási Alapítvány) Támogatásukat nagyra értékeljük. Köszönetünket fejezzük ki továbbá Dr. Taekhee Lee-nek a technikai segítségért. **Jogi nyilatkozat:** Bármely vállalatra vagy konkrét kereskedelmi termékre történő hivatkozás nem jelenti azt, hogy a szerzők vagy a Cincinnati Egyetem támogatója, ajánlja vagy előnyben részesíti azokat.

## Idézett irodalom

- (1) EPA (U.S. Environmental Protection Agency). *Ozone generators that are sold as air cleaners: an assessment of effectiveness and*

*health consequences*; <http://www.epa.gov/iaq/pubs/ozone-gen.html>; Accessed on May 22, 2006.

- (2) ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists). *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices*; ACGIH: Cincinnati, OH, 2004; p. 44.
- (3) OSHA (Occupational Safety & Health Administration). *Regulations (Standards 29 CFR): Air Contaminants, 1915.1000*; <http://www.osha.gov/pls/oshaweb>; Accessed on May 31, 2006.
- (4) FDA (U.S. Food and Drug Administration). *Labeling Regulatory Requirements for Medical Devices*; HHS publication FDA 89-4203; U.S. Government Printing Office: Washington, DC, 1989.
- (5) EPA (U.S. Environmental Protection Agency). *National Ambient Air Quality Standards (1997)*; <http://www.epa.gov/air/criteria.html>; Accessed on May 24, 2006.
- (6) Foarde, K. K.; VanOsdell, D. W.; Steiber, R. S. Investigation of gas-phase ozone as a potential biocide. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* **1997**, *12*, 535-542.
- (7) Li, C. -S.; Wang, Y. -C. Surface germicidal effects of ozone for microorganisms. *AIHA J.* **2003**, *64*, 533-537.
- (8) Alberici, R.M.; Canela, M.C.; Eberlin, M.N.; Jardim, W.F. Catalyst deactivation in the gas phase destruction of nitrogen-containing organic compounds using  $\text{TiO}_2$ /UV-VIS. *Appl. Catal., B* **2000**, *793*, 1-9.
- (9) Shang, J.; Du, Y.; Xu, Z. Photocatalytic oxidation of heptane in the gas-phase over  $\text{TiO}_2$ . *Chemosphere* **2002**, *46*, 93-99.
- (10) Matsunaga, T.; Tomoda, R.; Nakajima, T.; Nakamura, N.; Komine, T. Continuous sterilization system that uses photosemiconductor powders. *Appl. Environ. Microbiol.* **1988**, *54*, 1330-1333.
- (11) Saito, T.; Iwase, T.; Horie, J.; Morioka, T. Mode of photocatalytic bactericidal action of powdered semiconductor  $\text{TiO}_2$  on Streptococci mutants. *J. Photochem. Photobiol.* **1992**, *14*, 369-379.
- (12) Sunada, K.; Kikuchi, Y.; Hashimoto, K.; Fujishima, A. Bactericidal and detoxification effects of  $\text{TiO}_2$  thin film photocatalysts. *Environ. Sci. Technol.* **1998**, *32*, 726-728.
- (13) Goswami, D. Y.; Trivedi, D. M.; Block, S. S. Photocatalytic disinfection of indoor air. *Trans. ASME* **1997**, *119*, 92-96.
- (14) Goswami, T. K.; Hingorani, S.; Greist, H.; Goswami, D. Y.; Block, S. S. Photocatalytic system to destroy bioaerosols in air. *J. Adv. Oxidation Tech.* **1999**, *4*, 185-188.
- (15) Pal, A.; Min, X.; Yu, L. E.; Pehkonen, S. O.; Ray, M. B. Photocatalytic inactivation of bioaerosols by  $\text{TiO}_2$  coated membrane. *Int. J. Chem. Reactor Eng.* **2005**, *3*, A45.
- (16) Keller, V.; Keller, N.; Ledoux, M. J.; Lett, M.-C. Biological agent inactivation in a flowing air stream by photocatalysis. *Chem. Commun.* **2005**, *23*, 2918-2920.
- (17) Lin, C. -Y.; Li, C. -S. Effectiveness of titanium dioxide photocatalyst filters for controlling bioaerosols. *Aerosol Sci. Technol.* **2003**, *37*, 162-170.
- (18) Grinshpun, S.A.; Mainelis, G.; Trunov, M.; Adhikari, A.; Reponen, T.; Willeke, K. Evaluation of ionocair purifiers for reducing aerosol exposure in confined indoor spaces. *Indoor Air* **2005**, *15*, 235-245.
- (19) Lee, B.U.; Yermakov, M.; Grinshpun, S.A. Unipolar ion emission enhances respiratory protection against fine and ultrafine particles. *J. Aerosol Sci.* **2004**, *35*, 1359-1368.
- (20) Mayya, Y. S.; Sapra, B. K.; Khan, A.; Sunny, F. Aerosol removal by unipolar ionization in indoor environments. *J. Aerosol Sci.* **2004**, *35*, 923-941.
- (21) Grinshpun, S. A.; Adhikari, A.; Lee, B. U.; Trunov, M.; Mainelis, G.; Yermakov, M.; Reponen, T. Indoor air pollution control through ionization. In *Air Pollution XII*; Brebbia, C. A., Ed.; WIT Press: Southampton, U.K., 2004; pp 689-704.
- (22) Kekeze, M. M.; Sattar, S. A. A new ozone-based method for virus inactivation: preliminary study. *Phys. Med. Biol.* **1997**, *42*, 2027-2039.
- (23) O'Connell, K. P.; Bucher, J. R.; Anderson, P. E.; Cao, C. J.; Khan, A. S.; Gostomski, M. V.; Valdes, J. J. Real-time fluorogenic reverse transcription-PCR assays for detection of bacteriophages MS2. *Appl. Environ. Microbiol.* **2006**, *72*, 478-483.
- (24) Jones, M. V.; Bellamy, K.; Alcock, R.; Hudson, R. The use of bacteriophage MS2 as a model system to evaluate virucidal hand disinfectants. *J. Hosp. Infect.* **1991**, *17*, 279-285.
- (25) Havelaar, A. H.; van Olphen, M.; Drost, Y. C. F-specific RNA bacteriophages as a model for organism-specific viruses in fresh water. *Appl. Environ. Microbiol.* **1993**, *59*, 2956-2962.
- (26) Allwood, P. B.; Malik, Y. S.; Hedberg, C. W.; Goyal, S. M. Survival of F-specific RNA coliphage, feline Calicivirus, and *Escherichia coli* in water: a comparative study. *Appl. Environ. Microbiol.* **2003**, *69*, 5707-5710.
- (27) Adams, M.H. *Bacteriophages*; Interscience Publishers, Inc: New York, 1959.

**Jelen közlés tárgya egy jelenleg is folyamatban lévő vizsgálat, mely annak tudatában kerül közlésre, hogy az itt bemutatott eredmények egyelőre nem rendelkeznek megbízható tudományos megalapozottsággal. Az activTek**

- (28) Johnson, B.; Martin, D. D.; Resnick, I. G. Efficacy of selected respiratory protective equipment challenged with *Bacillus subtilis* subsp. *niger*. *Appl. Environ. Microbiol.* **1994**, *60*, 2184-2186.
- (29) Lin, X.; Reponen, T. A.; Willeke, K.; Grinshpun, S. A.; Foarde, K.; Ensor, D. Long-term sampling of airborne bacteria and fungi into a non-evaporating liquid. *Atmos. Environ.* **1999**, *33*, 4291-4298.
- (30) Lin, X.; Reponen, T.; Willeke, K.; Wang, Z.; Grinshpun, S. A.; Trunov, M. Survival of airborne microorganisms during swirling aerosol collection. *Aerosol Sci. Technol.* **2000**, *32*, 184-196.
- (31) Mainelis, G.; Grinshpun, S.; Willeke, K.; Reponen, T.; Ulevicius, V.; Hintz, P. Collection of airborne microorganisms by electrostatic precipitation. *Aerosol Sci. Technol.* **1999**, *30*, 127-144.
- (32) Hinds, W. C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, 1999.
- (33) Grinshpun, S. A.; Toivola, M.; Lee, S.-A.; Reponen, T. Formation of Nanoparticles in indoor air at an increased ozone level. In *Abstracts of the 24th Annual Meeting of the American Association for Aerosol Research*, Austin, Texas, U.S.A., October 17-21, 2005; AAAR: Mt. Laurel, NJ, 2005; p 327.
- (34) Von Sonntag, C. Disinfection by free radicals and UV-radiation. *Water Supply* **1986**, *4*, 11-18.
- (35) Turchi, C. S.; Ollis, D. F. Photocatalytic degradation of organic water contaminants: mechanisms involving hydroxyl radical attack. *J. Catal.* **1990**, *122*, 178-192.
- (36) Dunford, R.; Salinaro, A.; Cai, L.; Serpone, N.; Horikoshi, S.; Hidaka, H.; Knowland, J. Chemical oxidation and DNA damage catalyzed by inorganic sunscreen ingredients. *FEBS Lett.* **1997**, *418*, 87-90.
- (37) Hidaka, H.; Horikoshi, S.; Serpone, N.; Knowland, J. *In vitro* photochemical damage to DNA, RNA, and their bases by an inorganic sunscreen agent on exposure to UVA and UVB radiation. *J. Photochem. Photobiol., A* **1997**, *111*, 205-213.
- (38) Vohra, A.; Goswami, D. Y.; Deshpande, D. A.; Block, S. S. Enhanced photocatalytic inactivation of bacterial spores on surfaces in air. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* **2005**, *32*, 364-370.
- (39) Maness, P. C.; Smolinski, S.; Blake, D. M.; Huang, Z.; Wolfrum, E. J.; Jacoby, W. A. Bactericidal activity of photocatalytic TiO<sub>2</sub> reaction: toward an understanding of its killing mechanism. *Appl. Environ. Microbiol.* **1999**, *65*, 4094-4098.
- (40) Matsunaga, T.; Tamoda, R.; Nakajima, T.; Wake, H. Photoelectrochemical sterilization of microbial cells by semiconductor powders. *FEMS Microbiol. Lett.* **1985**, *29*, 211-214.
- (41) Rinco'n, A. G.; Pulgarin, C. Photocatalytic inactivation of *E. coli*: effect of (continuous-intermittent) light intensity and of (suspended-fixed) TiO<sub>2</sub> concentration. *Appl. Catal., B* **2003**, *44*, 263-284.
- (42) Marquis, R. E.; Sim, J.; Shin, S. Y. Molecular mechanism of resistance to heat and oxidative damage. *J. Appl. Bacteriol. Symp. Suppl.* **1994**, *76*, 40S-48S.
- (43) Tseng, C.-C.; Li, C.-S. Ozone for inactivation of aerosolized bacteriophages. *Aerosol Sci. Technol.* **2006**, *40*, 683-689.
- (44) Li, C.-S.; Wang, Y. C. Inactivation effects of airborne ozone for bioaerosols. *J. Environ. Health* **2006**, submitted.

Received for review June 8, 2006. Revised manuscript received September 19, 2006. Accepted October 20, 2006.

ES0613730