

Утааны механик шинж чанарыг судлах хялбар арга

Ж.Ванчинхүү*, Ж.Даваасамбуу, Б.Бат-Эрдэнэ

МУИС, ШУС, Физикийн тэнхим

Утааны бөөмцөрийн шугаман хэмжээ, тоон нягт буюу концентраци, хурд, бөөмцөр хоорондын зай, утаан дахь бөөмцөрийн концентраци зэрэг зарим механик шинж чанарыг хялбар тодорхойлох боломжит арга, аргачлалыг энд судлав. Энд дэвшүүлж байгаа аргыг ашиглан тамхины утааны зарим механик шинж чанарыг тогтоож агаар мандал руу орж байгаа эмиссийг үнэлэв. Агаарын бохирдлын судалгааны ажилд тохиромжтой байх зарим шинэ параметруудыг дэвшүүлэн гаргасан.

PACS# 64.70.ps, 68.60.Bs

Удиртгал

Төрөл бүрийн түлшний шаталтаас ялгаран гарах утаа нь шаталтын зайлшгүй үр дагавруудын нэг юм. Шаталт нь физик химийн олон шаттай процессуудын явцад түлшний материалууд хүчилтөрөгчтэй урвалд орох процесс юм [1-3]. Энэ процессын явцад ялгарах энерги нь дулаан ба цацаргалт хэлбэрээр харин урвалын бүтээгдэхүүнүүд нь утаа хэлбэрээр гадагшилж байдаг. Харин түлшинд агуулагдах үл шатах хэсгүүд нь үнс болж үлддэг. Шаталтаас ялгарч байгаа утаа нь түлшний халалт болон шаталтаас гарах хийн бүтээгдэхүүнүүд, шаталтын явцад бий болсон хатуу болон шингэн төлөвт орших жижиг хэсгүүдийг агуулж байдаг [2]. Эдгээр жижиг хэсгүүдийг нийтэд нь утааны бөөмцөр (smoke particulate) гэж нэрлэдэг. Эдгээр нь галаас гарахдаа харьцангуй өндөр температуртай байдаг бөгөөд утаатай хамт гадагшлах явцдаа саадын гадаргуу дээр конденсацлаж тэндээ сууж үлддэг. Үүнийг бид хөө, ис нэршлээр нь мэднэ.

Утааны бөөмцөрүүд гэрэл сарниулдаг учраас утаа бидний нүдэнд тод харагдах төдийгүй гэрэл шингээдэг учраас агаар мандал дотор их хэмжээгээр хуримтлагдсан үедээ үзэгдэх орчны хэмжээг хязгаарлаж байдаг. Үүнээс гадна эдгээр нь агаар мандлыг бохирдуулагч гол агент юм. Эдгээрийн концентраци, тус бүрийн хэмжээ, хоорондын зай, суултын хурд нь утааны механик шинж чанарыг үзүүлдэг гол хэмжигдэхүүнүүд юм.

Утааны бөөмцөрийн физик шинж чанар, бүтцийг рентген дифракц, Раман спектроскоп, Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) зэрэг аргуудаар олон талаас нь судалсан байдаг [4-7]. Харин янз бүрийн түлшнээс гарч байгаа утааны механик шинж чанар тухайлбал бөөмцөрийн концентраци, бөөмцөрийн шугаман хэмжээ,

тоон нягт, бөөмцөрийн материалын нягт зэргийг центрфугтэй масс анализатор, Differential Mobility Spectrometer (DMS) багажаар судалсан байдаг [8-10] бөгөөд утааны бөөмцөрийн оптик шинж чанарыг ч мөн авч үзсэн байдаг [11-12].

Агаарын бохирдолд утааны механик шинж чанар нөлөөллийн хувьд чухал ач холбогдолтой байдаг. Утааны механик шинж чанарыг мэдсэнээр утаанаас үүдэлтэйгээр агаарт бий болсон бохирдуулагч агентуудын хэмжээ, нөлөөг тогтоох боломж бүрддэг.

Манай улсын төв суурин газруудын агаарын бохирдол ихэссэнтэй холбоотойгоор энэ чиглэлийн судалгааны ажил 2000-иад оны сүүлчээс хийгдэж эхэлсэн. Агаарын бохирдлын мониторинг хийх, шаталтаас гарч байгаа агаар бохирдуулагч агентуудыг судлахдаа хий хэлбэртэй бохирдуулагчдыг хийн анализатор ашиглан хэмждэг. Харин бөөмцөрийг судлахдаа шүүх аргыг өргөн ашиглаж байна. Шүүх аргаар агаар бохирдуулагч агентуудын хэмжээг тогтохдоо утаа, эсвэл бохирдолтой агаарыг соруулан авч механик шүүлтүүр ашиглан түүний доторхи бөөмцөрүүдийг шүүж аваад түүнийхээ массыг хэмжиж энэ массыг соруулсан утааны эзлэхүүнд харьцуулан бохирдлын хэмжээг мкг/м^3 нэгжээр илэрхийлэн гаргадаг. Энэ зарчим дээр тулгуурлан ажилладаг тусгайлсан багажууд ч бас бий. Гэхдээ ийм багажуудын хэмжих хязгаар хязгаарлагдмал байдаг. Тухайлбал, бохирдуулагч агентын концентрацийг тодорхойлдог DustTrak төрлийн багажуудын хэмжих хязгаар 600 мкг/м^3 -аас хэтэрдэггүй. Гэтэл галаас гарч байгаа утааны концентраци хэдэн г/м^3 хүрэх тохиолдол ч бий. Энэ тохиолдолд утааны бөөмцөрийн концентраци багажийн хэмжих хязгаарыг давж гарах учраас шууд хэмжих боломжгүй болж механик шүүлтүүр ашиглан ялгаж аваад дараа нь хэмжих арга руугаа шилжих шаардлагатай болдог. Ингэж хэмжихэд олон тооны багаж

* Electronic address: j.vanchinkhuu@num.edu.mn

нэмэлт материал шаардлагатай болох төдийгүй хэмжилт боловсруулалтанд ихээхэн хугацаа шаардагддаг.

Бөөмцөрийн хэмжээг тодорхойлох орчин үеийн нарийн аргууд байдаг боловч үнэ ихтэй багаж шаарддаг, нөгөө талаас манай нөхцөлд олдоц муу байна.

Нэгж үүсгэгчээс гарч агаар мандал руу орж байгаа бохирдуулагч агент бүрийг тогтоож түүний гарцыг хянаж агаар мандал руу орох хувь хэмжээг тогтоогдсон хэмжээнд байлгах нь агаарын бохирдлыг бууруулах үйл ажиллагааны нэг чухал зорилт юм. Шаталтаас гарч байгаа бохирдуулагч агент бүрийн гарцыг тодорхойлох нь олон төрлийн багажуудыг нэгэн зэрэг ашиглан хийх томоохон цогц ажил байдаг. Манай улсын төв суурин газрын агаарын бохирдлын ихэнх хэсгийг утааны бөөмцөрүүд бий болгож байдаг бөгөөд агаар мандал дахь бөөмцөрийн хэмжээ ихэссэнээр утаан манан үүсэж харагдах орчныг бууруулж байдаг. Үүний зэрэгцээ агаарын доторхи тоосонцорын концентраци ихэссэнээр түүний амьсгалаар дамжин амьд биеийн дотор орох магадлал нь нэмэгдэж халдварт болон халдварт бус өвчлөлийн шалтгаан болдог. Ийм учраас агаарын бохирдлын судалгаанд утааны тоосонцорын хэмжээг тогтоох явдал эн тэргүүнд зайлшгүй авч үзэх асуудал болдог.

Бид энэ судалгааны ажилд төрөл бүрийн шаталтаас үүдэлтэйгээр агаар мандал руу орж байгаа бохирдуулагч агентуудын дотроос нөлөөллийн хувьд хамгийн өндөр хэмжээтэй байдаг утааны тоосонцорын механик шинж чанарыг хэрхэн хялбар судлах тухай асуудлыг дэвшүүлэн тавьж байгаа юм.

Аливаа түлшний шаталтын явцад тодорхой хэмжээтэй бөөмцөрүүд (эдгээрийг заримдаа шаталтын ширхэгт бүтээгдэхүүнүүд гэдэг) үүсч тодорхой хурдтайгаар галаас гадагшилж байдаг. Эдгээр нь микрометрийн эрэмбийн хэмжээтэй бөгөөд гэрэл сарниулагч объект байдаг. Бөөмцөрөөс сарниж байгаа энэ гэрэл нь тухайн бөөмцөрийн талаар болон системийн талаар их хэмжээний мэдээлэл агуулж байдаг. Манай шийдэл утааны бөөмцөрийн гэрэл сарниулдаг энэ чанарыг ашиглаж байгаа бөгөөд утаан дээр гэрэл тусган түүнээс сарнисан гэрлийг бүртгэж авах замаар гэрэл сарниулагч объект болон системийн механик шинж чанаруудыг богино хугацаанд тогтоох хялбар бөгөөд үр дүнтэй замыг санал болгодог.

Жижиг бөөмцөрүүд агуулсан утаа, уур, үүл зэрэг дисперсэт систем дээр тодорхой долгионы урттай дан өнгийн гэрэл тусгахад түүнээс

сарнисан гэрлийн эрчим I дараах томъёогоор тодорхойлогддог [2]:

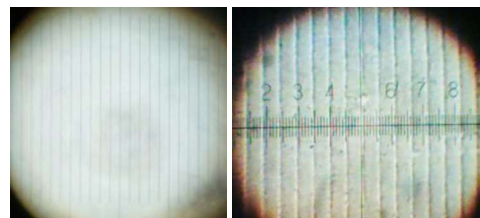
$$I \cong I_0 l \Omega \eta \sum_i c_i \sigma_{i,sc}$$

I_0 -тусгаж байгаа гэрлийн эрчим, l -лазерын цацрагийн ажиглагдаж буй урт буюу систем дотуур туулсан зай (ойролцоогоор 1 мм байна), Ω -ажиглаж буй биелэг өнцөг, η –гэрэл бүртгэх детекторын ашигт ажиллагааны коэффициент, c_i -сарниулагч төвүүдийн концентраци, $\sigma_{i,sc}$ - сариулагч төвийн сарниулах огтлол.

Энэ гэрлийг бүртгэн авч гэрлийн эрчмийг хэмжсэнээр системийн дотор байгаа бөөмцөрийн концентрацийг тодорхойлж болно [2,3]. Үүнээс гадна гэрлийн эрчим хангалттай их байхад энэ сарнисан гэрлийг микроскопын объектив рүү чиглүүлэн түүний харааны хавтгайд фокуславал түүн дотор байгаа бөөмцөрүүд нүдэнд үзэгдэхүйц тодорхой харагддаг. Нэгэнт ингэж нүдээр харж байгаа бол түүний дээр дурдсан механик шинж чанаруудыг окулярын хуваарийг ашиглан хэмжиж авч болно.

Туршилтын багаж төхөөрөмж

Микроскоп Бөөмцөрийн дээр дурдсан механик шинж чанаруудыг энгийн нүдээр харж тогтооход микроскоп, объектив микрометр юмуу дифракцийн тор шаардлагатай болдог. Харин бөөмцөрийг бүртгэж авах тохиолдолд фотоэлемент юмуу CCD камер хэрэглэгдэнэ.



а) б)

Зураг 1. а) Микроскопын харааны талбайд үүссэн объектив микрометрийн дүрс (хоёр зураасын хоорондох зай 10 мкм), б) 600х өсгөлттэй микроскопын хуваарь бүхий окулярын хавтгайд харагдаж байгаа 1/100 дифракцийн торын өссөн дүрс.

Объект микрометрийг дүрсийн хэмжээг тогтооход ашиглах бөгөөд ихэнх объект микрометрийн хуваарийн үнэ 10 мкм байдаг (Зураг 1а) учраас бага хэмжээтэй объектийн дүрсийг тогтооход тохиромжтой биш байдаг. Ийм учраас илүү нарийвчлал бүхий объектийг ашиглах шаардлагатай болдог. Орчин үеийн дифракцийн торын тогтмол 50-2500 зураас/мм

(Зураг 16). Энэ тохиолдолд нэг зураасын хоорондох зай 20-0.4 мкм байна.

Микроскопын өсгөлт K нь объективын өсгөлт $k_{об}$ ба окулярын өсгөлт $k_{ок}$ -ийн үржвэрээр тодорхойлогддог:

$$K = k_{об} \times k_{ок}.$$

Микроскопын объективын өсгөлт 10-100, окулярын өсгөлт голчлон 10, 15, 20, 25 байдаг. Ийм учраас оптик микроскопын максимум өсгөлт 2500 байна.

Оптик микроскопын хувьд өсгөлтөөс гадна уг микроскопоор ажиглаж болох хамгийн бага хэмжээ нь түүний бас нэг чухал үзүүлэлт болдог. Энэ нь микроскопын ялгах чадвараар тодорхойлогддог. Ялгах чадвар нь өсгөгдсөн дүрс дотор байгаа элементүүдийн ялгарлыг үзүүлдэг бөгөөд объект дээр байгаа 2 цэгийн микроскопоор харахад ялгарч харагдах хамгийн бага зайгаар тодорхойлогддог. Үүнийг Релейн шалгуурыг ашиглан тухайн микроскопын хувьд дараах томъёогоор тодорхойлж болно:

$$L = \frac{1.22\lambda}{NA_{obj} + NA_{cond}}$$

Энд: λ -ажлын гэрлийн долгионы урт бөгөөд манай судалгаанд хэрэглэсэн ногоон гэрлийн лазерын хувьд $\lambda = 0.530$ мкм, $NA_{obj} = n \sin(\theta/2)$ -микроскопын объективын тоон аператур, $NA_{cond} = n \sin(\theta'/2)$ -конденсерын тоон аператур, n - объектив ба тавиур эсвэл конденсер ба тавиурын хоорондох орчны хугарлын илтгэгч бөгөөд агаар байгаа бол $n = 1$ байна, θ, θ' - апературын өнцөг (олонхи конденсерийн апературын өнцөг нь 144° байх бөгөөд үүнд харгалзан тоон аператур нь 0.95 байдаг). Микроскопын хязгаарын ялгах чадвар нүдний хамгийн сайн харах 514 нм долгионы урттай гэрэлд харгалзах ба 0.26 мкм байдаг. Харин харж болох хамгийн бага долгионы уртын (400 нм) хувьд 0.2 мкм байхыг тогтоож болно. Бидний ашиглаж байгаа системийн хувьд конденсерын аператур тооцогдохгүй учраас ногоон лазерын хувьд 40х ба 100х өсгөлттэй объектив бүхий микроскопын ялгах чадвар харгалзан $L = \frac{1.22\lambda}{NA_{obj}} = 0.99$ мкм, 0.51 мкм байна.

Окулярын хуваарийн үнэ Объектийн хэмжээг микроскопын харааны талбайд байгаа хуваарьтай харьцуулах замаар тодорхойлдог. Микроскопын окулярын хавтгайд хуваарьтай зураас байрладаг. Эдгээр зураасын хоорондох зай буюу хуваарийн үнийг өсгөлт бүр дээр тодорхойлох шаардлагатай. Үүний тул объектмикромметр ашиглана. Тухайлбал, Зураг 1 б-д 1/100 зураас бүхий дифракцийн зургийн

өсгөсөн дүрсийг үзүүлэв. Энэ дүрсийн m ширхэг зураас окулярын хуваарийн n зураастай давхцаж байгаа учраас окулярын хуваарийн үнэ дараах томъёогоор олдоно:

$$d = m \cdot \frac{l}{n},$$

энд: l -дифракцийн торын зэргэлдээ хоёр зураасын хоорондох зай. Энэ зургийн окулярын хуваарийн үнэ 1.875 мкм байна. Энэ утгыг тодорхойлсноор бид микроскопын харааны хавтгайд фокуслагдсан дүрсийн хэмжээг окулярын хуваарийг ашиглан тогтоох боломжтой болж байгаа юм. Энэ хэмжилтийг ялгаатай тооны зураасуудын хооронд хэд хэдэн удаа хийж дундажлан хуваарийн үнийг нарийвчлан тогтооно. Дифракцийн тор эсвэл объект микрометрийн хуваарийн үнэ тодорхойгүй байгаа бол тэдгээрийг дифракцийн үзэгдэл ашиглан тодорхойлж болно гэдгийг энд дурдая.

Утааны камер Утаа нь хөдөлгөөнт объект учраас түүнийг ажиглахын тулд нэг чиглэлд тогтвортой урсгах юм уу эсвэл тодорхой орон зайн дотор «түгжих» шаардлагатай болдог. Үүнийг хэрэгжүүлэхэд утааны камерыг ашигладаг. Энэ нь тодорхой эзлэхүүнтэй, жигд хөндлөн огтлолтой нэг талаас нь ажиглаж, өөр нэг талаас нь гэрэлтүүлж болох тунгалаг цонхууд бүхий битүү сав юм (Зураг 2). Утааг камерт оруулж үзэгдэх гэрлээр гэрэлтүүлэхэд утааны бөөмцөрөөс гэрлийн сарнил үүсдэг. Утааны бөөмцөрүүдийн сарниулсан гэрлийг микроскопын харааны талбайд чиглүүлэн фокуслаж бөөмцөрийн тод дүрсийг гарган авна. Дүрсийг CCD камераар компьютерт дамжуулж болно.

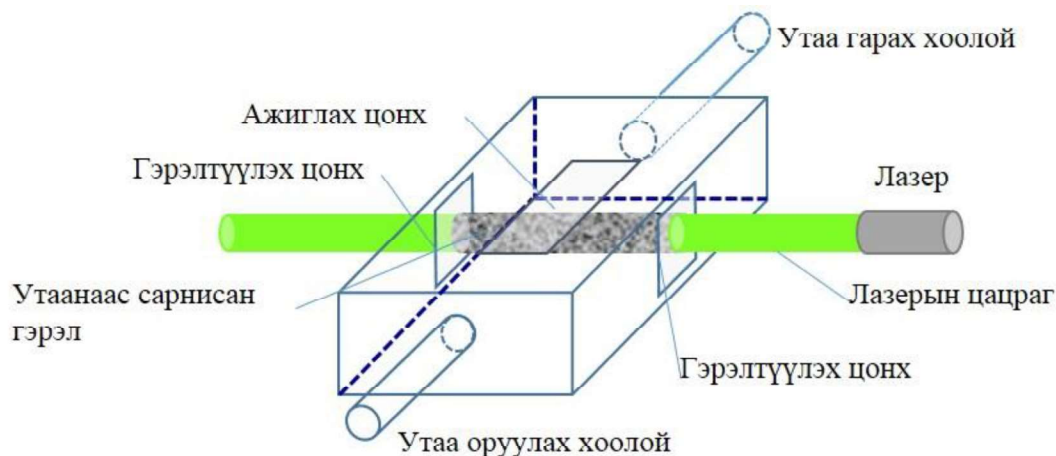
Шаталтаас ялгарч байгаа утааг хоолойгоор дамжуулан ажиглалтын камер луу оруулдаг. Бага диаметртэй хоолойгоор дамжуулан утааг камерт оруулах нь хялбар биш байдаг. Утааг оруулахын тулд шаталт ба камерын хооронд даралтын градиент үүсгэх шаардлагатай бөгөөд үүнийг температураар удирдаж гүйцэтгэх нь илүү зохимжтой байдаг.

Утааны бөөмцөрийн хурдыг хэмжих

Утааны камерыг микроскопын тавиурт бэхэлж лазерын гэрлийг асаасны дараа утааг камерт оруулахад утааны бөөмцөрүүд лазерын гэрлийг сарниулсаны улмаас камер дотор тархаж буй гэрлийн дагууд тод ногоон өнгөтэй цилиндр үүснэ. Микроскопын тубусыг хөдөлгөн (зарим микроскопт суурийг шилжүүлдэг) энэ цилиндрийн хөндлөн огтлолын аль нэг хөвч болон өндрийг дайрсан хавтгайг харааны талбайд фокуслаж утааны доторхи бөөмцөрийн

тод дүрсийг гарган авна. Камерт ямар нэг алдагдал (leak) байхгүй бол утааны урсгал жигдрэх үед камерын орох гарах хоолойгоор ижил хэмжээний утаа урсана. Энэ үед утааны

хурд тогтмол байх бөгөөд бөөмцөрүүд урсгалын дагуу нэг зүг чиглэн тогтмол хурдтай хөдөлнө. Утааны бөөмцөрийн чиглэсэн хөдөлгөөний хурд нь үнэндээ утааны урсгалын хурд юм.



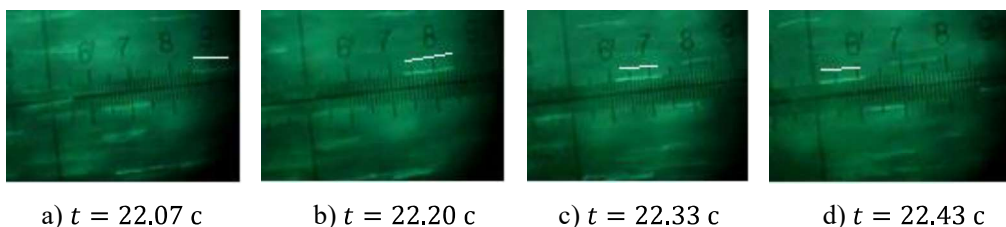
Зураг 2. Утааны бөөмцөрийн механик шинж чанарыг тодорхойлоход ашиглах камер бүтэц, түүний гэрэлтүүлэг.

Ийм учраас утааны бөөмцөрийн хурдыг хэмжиж утааны хурдыг тодорхойлно. Бөөмцөрийн хөдөлгөөний хурдыг нүдээр ажиглаж хэмжихийн оронд түүний хөдөлгөөнийг CCD камер ашиглан бичиж аваад боловсруулалт хийх нь илүү тохиромжтой байдаг. Камерын бичлэгийн хурдаас хамаарч бүртгэгдэж байгаа бөөмцөр цэгээр эсвэл тодорхой урттай гэрэлтэй шугам хэлбэртэй бүртгэгддэг. Хэрэв CCD камерын бичих хурд бага бол хөдөлж байгаа бөөмцөр шугам байдлаар дүрслэгдэнэ (Зураг 3).

Энэ тохиолдолд бөөмцөрт харгалзан бичигдсэн шугамын урт l -ийг камерын бичлэгийн интервал τ -д хувааж олно:

$$v = \frac{l}{\tau}$$

Шугамын уртыг окулярын хуваариас тоолж аваад хуваарийн үнээр үржүүлж олно. Энэ ажилд бид $1/8$ с бичлэгийн интервалтай CCD камер ашиглав.



Зураг 3. Бүрэн шаталтын үед ялгарах утааны хурдтай утааны бөөмцөрийн хөдөлгөөн (өсгөлт 100х, хуваарийн үнэ 8.68 мкм)

Иймд Зураг-3-т үзүүлсэн бөөмцөрийн хурд $v = \frac{100.73 \text{ мкм}}{0.125 \text{ с}} = 804 \text{ мкм/с}$ байна.

Нөгөө талаас энэ хурд үнэн эсэхийг зураасын хөдөлгөөний хурдаар магадлаж болно. Зураасын эхний дөрвөн байрлалд харгалзах хугацааны эгшин өгөгдсөн учраас энэ хурд дараах утгатай байна:

$$\bar{v} = \frac{l}{\tau} = 815 \text{ мкм/с.}$$

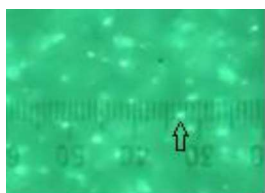
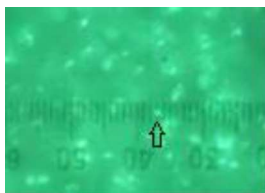
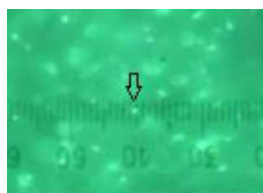
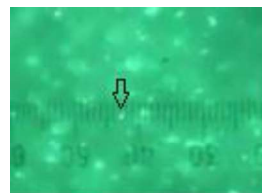
(энд бөөмцөр t хугацааны дотор туулах замыг s -ээр тэмдэглэв). Энэ утга өмнөх утгатай алдааны хүрээнд бараг тохирч байна.

Хэрэв бичих хурд хангалтай өндөр юмуу эсвэл бөөмцөрийн хурд бага бол бөөмцөр хөдөлгөөний эгшин бүрт толбо байдлаар бүртгэгддэг (Зураг 4). Энэ тохиолдолд бөөмцөрийн хөдөлгөөний хугацааг хэмжиж энэ хугацаанд туулсан замын хэмжээг окулярын хуваарийн үнийг ашиглан шууд тодорхойлоод мөн l дээрх томъёог ашиглан эдгээрийн харьцаагаар хурдыг тодорхойлж болно. Зураг 4-т өгөгдсөн бөөмцөрийн координат ба хугацаанаас түүний хөдөлгөөний дундаж хурдыг хэмжвэл $v = 49.5 \text{ мкм/с}$ байхыг тогтоож болно.

Энэ үр дүнгээс харахад ямарч түлшний шаталтын эхний шатанд утааны хурд бага байх

бөгөөд бүрэн шаталтын горимд шилжих үед утааны хурд эрс ихэсдэг нь харагдаж байна. Урсгал тасралтгүйн тэгшитгэлийг ашиглан энд хэмжсэн хурдаар галаас гарч байгаа утааны хурдыг хэмжиж болно. Энэ хэмжигдэхүүний

утга утааны цахилгаан шүүлтүүрийн тооцоонд чухал ач холбогдолтой байдаг. Ердийн задгай галаас гадагшилж байгаа утаа хурд ойролцоогоор 0.05-0.07 м/с байдаг.

a) $t = 31.57$ cb) $t = 32.50$ cc) $t = 33.10$ cd) $t = 33.60$ c

Зураг 4. Шаталтын эхний үед ялгарах бага хурдтай бөөмцөрийн хөдөлгөөн (Байрлал бүрд харгалзах хугацааны эгшнийг доор нь тэмдэглэв. Өсгөлт 70х, окулярын хуваарийн үнэ 10 мкм).

Харин агаарын чанарын албаны лабораторит шалгасан хэмжилтийн үр дүнгээр зуухнаас гарах утга үнэхээр 1-3 м/с байдаг. Харьцангуй бага хурдтай хөдөлж байгаа бөөмцөрийн хөдөлгөөнийг ажиглахад тэдгээр нь чиглэсэн хөдөлгөөнөөс гадна эмх замбараагүй хөдөлж байдаг. Эмх замбараагүй хөдөлгөөний дундаж хурд тэгтэй тэнцүү байх нь ойлгомжтой. Утааг битүү саванд оруулж ажиглалт хийх үед энэ хөдөлгөөн тод ажиглагдана.

Бид утааны хөдөлгөөний хурдыг өөрсдийн боловсруулсан утаанд мониторинг хийх аргадаа тулгуурлан тогтоож агаарын чанарын албаны лабораторит батлах хэмжилт хийснээс гадна Питот хоолойгоор тодорхойлсонутгатай жишिव. Эдгээр хэмжилтийн утгатай харьцуулбал манай боловсруулсан утааны хурдыг хэмжих энэ процедур нэлээд үнэмшилтэй байгаа нь тогтоогдлоо.

Эцэст нь утааны хурдыг хэмжих тохиолдолд микроскопын өсгөлт өндөр байх төдийлэн шаардлагагүй, харин бөөмцөрүүдийн дүрс маш бага хэмжээтэй байх өсгөлтийг сонгон авах хэрэгтэй гэдгийг тэмдэглэе. Энэ хэмжилтэд 10х өсгөлттэй объектив, 7х-10х өсгөлттэй хуваарьтай окуляр ашиглах хамгийн тохиромжтой.

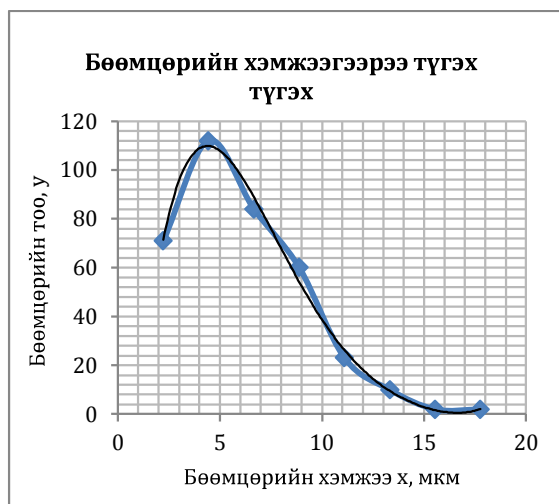
Бөөмцөрийн хэмжээ, хэмжээгээр түгэх түгэлт
Утааны бөөмцөрийн хэмжээг мөн л дээрх процедурыг ашиглан хэмжинэ. Утааг камерт оруулж тогтвортой жигд урсгал бий болгосны дараа орох ба гарах хоолойг зэрэг хаана. Энэ үед камер утаагаар дүүрч утаа камер дотор бараг жигд тархсан байна. Микроскопын харааны талбайд үүсэж байгаа бөөмцөрийн дүрсийн хөдөлгөөн эмх замбараагүй байдаг тул тэдгээрийн хэмжээг нүдээр ажиглан тогтооход бэрхшээлтэй байдаг. Ийм учраас микроскопыг фокуслан утааны бөөмцөрийн тод дүрсийг гарган авч түүний хөдөлгөөний бичлэгийг

хийнэ. Битүү камер дотор байгаа утааны бөөмцрүүд эмх замбараагүй хөдөлгөөн хийх бөгөөд тод дүрс өгч байгаа бөөмцөрийн хэмжээг окулярын хуваариар тогтооно.



Зураг 5. Микроскопын окулярын хавтгайд үүсэж буй бөөмцөрийн дүрс (Өсгөлт 400х, окулярын хуваарийн үнэ $d=2.25$ мкм).

Тухайлбал, Зураг 5-д хэд хэдэн бөөмцөрийн тод дүрсийг үзүүлэв. Энэ зургийн хуваарь дээр байрлаж байгаа хоёр бөөмцөрийн хэмжээ харгалзан 4.5 мкм, 6.7 мкм байна. Ийм байдлаар тамхины утааны доторхи 300 гаруй бөөмцөрийн шугаман хэмжээг олж бөөмцөрийн хэмжээгээрээ түгэх түгэлтийг гаргав (Зураг 6). Энэ хэмжилтийн үр дүнгээс үзэхэд тамхины утааны бөөмцөрийн минимум хэмжээ 0.6 мкм, максимум хэмжээ 26 мкм бөгөөд ийм хэмжээтэй бөөмцөрүүд 1000-аас цөөнгүй бөөмцөр дотор нэг удаа тааралдах боломжтой байдаг. Энэ түгэлтийн хувьд бөөмцөрийн дундаж хэмжээ 6.05 мкм, хамгийн магадлангүй хэмжээ нь 4.4 мкм байх нь харагдаж байна. Тамхины утааны бөөмцөрийн хэмжээ ийм бага байдаг учраас Ми сарнилын улмаас утаа хөх цэнхэр харагддаг гэсэн дүгнэлтийг хийж болно. Гэрлийн сарнилын онолын үүднээс авч үзвэл утаа бараг хөх ягаан өнгөтэй харагдах ёстой боловч хүний нүдний мэдрэх чадвар энэ мужид цэнхэр өнгө дээр хамгийн их байдаг тул утааны өнгө ингэж тодорхойлогддог болж таарч байна.



Зураг 6. Утааны бөөмцөрийн хэмжээгээр түгэх түгэлт.

Энэ аргаар бөөмцөр хатуу эсвэл шингэн төлөвт байгаа эсэхээс нь үл хамааран түүний хэмжээг тодорхойлж болно. Туршилтын явцад хийсэн ажиглалтаас харахад бөмбөрцөгт ойр хэлбэртэй бөөмцөр ихэвчлэн шингэн хэлбэрт байгаа нь харагддаг. Үүнийг цаашид бөөмцөрийн хэлбэрт хийх морфологийн судалгаагаар нарийвчлан тогтоож болох юм.

Бөөмцөр хоорондын зай

Утааны доторхи бөөмцөрүүд өөр өөр хэмжээтэйгээс гадна тэдгээрийн хоорондох зай харилцан адилгүй байдаг. Бөөмцөр хоорондын зай нь утааны механик шинж чанарыг тухайлбал утааны өтгөн, сийрэг чанарыг үзүүлэх нэг чухал хэмжигдэхүүн юм. Утааны өтгөн, сийрэг чанарыг түүн дотор байгаа бөөмцөрийн концентраци буюу тоон нягт гэсэн хэмжигдэхүүнээр тодорхойлдог боловч бөөмцөр хоорондын зайгаар ч бас илэрхийлэх боломжтой. Утааны доторхи бөөмцөрүүдийн хоорондын зай их байх тусам утаа сийрэг, харин бага байхад утаа өтгөн байдаг. Ийм учраас энэ хэмжигдэхүүн утааны оптик шинж чанартай ч бас холбоотой болдог.

Бөөмцөр хоорондын зайг хэмжихийн тулд утааг камерт оруулж өмнөхийн адил жигд урсгал үүсгэнэ. Ийм жигд урсгалтай үед бөөмцөр хоорондын зайг окуляр хуваарийг ашиглан хэмжиж авна. Зураг 5-д байгаа хуваар дээр байрлах гурван бөөмцөрийн хувьд хоорондох зай нь харгалзан 96,75 мкм, 27 мкм байна. Утааны бөөмцөр хоорондын зайг нарийвчлан ажиглахад утааны урсгалын дагуу ба хөндлөн чиглэлд бөөмцөр хоорондын зай бага зэрэг ялгаатай байгаа нь ажиглагддаг. Үүнээс гадна хөндлөн чиглэлд хэмжсэн бөөмцөр хоорондын зай хугацаанаас хамаарч хүндийн хүчний дагуу

ба хөндлөн чиглэлд мөн ялгаатай болох хандлага ажиглагддаг.

Бөөмцөрийн концентраци

Эхлээд утааг камерт оруулж утааны стационар урсгал бий болгосны дараа утааны бөөмцөр хоорондын зай болон бөөмцөрийн хэмжээг тогтооно. Бөөмцөр хоорондын дундаж зайг тодорхойлохдоо нэг шугам дээр оршиж байгаа хоёр бөөмцөрийн хоорондын зайг окулярын хуваарийг ашиглан хэмжинэ. Энэ хэмжилтийг олон тооны хос бөөмцөрийн хувьд гүйцэтгэж бөөмцөр хоорондын дундаж зайг тогтооно. Бөөмцөр хоорондын зайг l_{avr} гэж үзвэл утааны доторхи бөөмцөрийн концентраци буюу тоон нягтыг дараах илэрхийллээр тодорхойлж болно:

$$n \approx \frac{1}{l_{avr}^3}.$$

Энэ утга нь утааны урсгал дахь бөөмцөрийн концентраци юм. Энэ илэрхийллийг ашиглан тооцоо хийж төрөл бүрийн түлшний шаталтаас гарах утааны бөөмцөрийн концентрацийг тодорхойлж болно.

Агаарын бохирдлыг судалгаанд тоосонцорын концентрацийг $г/м^3$ нэгжээр илэрхийлдэг. Энэ нь утааны нэгж эзлэхүүнд байгаа бөөмцөрийн масс юм. Манай судалгааны аргаар энэ хэмжигдэхүүнийг ч мөн тодорхойлох боломжтой. Бөөмцөрийн материалын нягт α бол түүний масс $\mu \approx \alpha d_{avr}^3$ байх учраас утааны тоосонцорын нягт дараах томъёогоор илэрхийлэгдэнэ:

$$\rho = \mu n \approx \alpha \frac{d_{avr}^3}{l_{avr}^3}.$$

Тамхины утааны хувьд бөөмцөрийн дундаж хэмжээ нь 6 мкм, бөөмцөр хоорондын зай 56 мкм байдаг. Тамхины утааны бөөмцөрийн материалын нягт $\sim 1200 \text{ кг}/м^3$ байдаг [8]. Иймээс тамхины утааны доторхи бөөмцөрийн массаар илэрхийлэгдсэн концентраци буюу утааны доторхи бөөмцөрийн нягт дараах утгатай байна:

$$\rho = (1.5 \div 1.6) \cdot 10^{-3} \frac{г}{см^3}.$$

Агаарын бохирдлын судалгаанд нэгж үүсгэгчийн ялгаруулах тоосонцорын эмиссийн хэмжээг илэрхийлэх зайлшгүй шаардлагатай байдаг. Өнөөдөр Монгол улсын хэмжээнд тухайн үүсгэгчийн ялгаруулах нийт тоосонцорын массаар нь уг үүсгэгчийн бохирдуулах чанар буюу эмиссийг үнэлж тогтоодог. Энэ нь агаарын бохирдлын үнэлгээнд чухал боловч судалгааны ажилд параметр болгон хэрэглэхэд тохиромж муутай байдаг. Харин нэгж үүсгэгчийн бохирдуулагч

ялгаруулах чадварыг хувьд нэгж хугацаанд агаар мандал руу оруулж байгаа тоосонцорын хэмжээгээр нь үнэлбэл илүү тохиромжтой. Үүнийг судалгааны параметр болгон авахад ч тохиромжтой юм. Дээр тодорхойлсон утааны доторхи бөөмцөрийн нягтыг ашиглан энэ параметрийг зохиоё. Утааны нэгж эзлэхүүнд ρ масстай бөөмцөр агуулагдах бөгөөд энэ нь v хурдтайгаар гадагшилна. Нэгж хугацаанд урсан гарах утааны эзлэхүүн Sv (S -утаа гадагшлах хоолойн хөндлөн огтлолын талбай) учраас энэ утааг гаргаж байгаа үүсгэгчээс нэгж хугацаанд агаар мандал руу орох бөөмцөрийн хэмжээ дараах томъёогоор илэрхийлэгдэнэ:

$$m = \rho Sv.$$

Энэ хэмжигдэхүүн нь үүсгэгчийн бохирдол ялгаруулалтыг үзүүлэх бөгөөд г/с нэгжтэй байна. Үүнийг үндэслэн ширхэг тамхинаас агаар луу орох бохирдлын хурд $m \sim 1.5 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$ байна гэдгийг тооцоолон гаргаж болно.

Дүгнэлт

Бидний дэвшүүлж буй энэ аргаар утааны доторхи бөөмцөрийн төдийгүй дисперслэгдсэн бусад орчны (цементийн үйлдвэрлэл, шүршдэг будагтай орчин, уур манантай орчин зэрэг) дотор байгаа бөөмцөрийн механик шинж чанарыг лабораторийн нөхцөлд бүрэн тодорхойлж болно. Энэ аргыг цахилгаан оронд хэрэглэх замаар бөөмцөрийн цахилгаан шинж чанарыг ч бас тодорхойлох боломжтой юм. Энэ арга нь түргэн, найдвартай төдийгүй илүү хямд төсөр юм. Энэ аргыг ашиглан тогтоосон утааны механик шинж чанарыг тодорхойлох хэмжигдэхүүнүүдийн утга бусад арга, багаж ашиглан хэмжсэн үр дүнтэй алдааны хязгаар дотор давхацдаг.

Сарнисан гэрлийн эрчим сарниулагч төвүүдийн тоонд пропорциональ байдаг. Ийм учраас судалж байгаа системийн сарниулагч төвийн

концентраци бага байвал бүртгэгдэж байгаа гэрлийн эрчим бага байх бөгөөд энэ нь энэ аргыг хэрэглэх хязгаарыг тогтоож байдаг.

Энэ аргачлалаар утааны бөөмцөрийн хэмжээг тогтоох нь хэд хэдэн давуу талтай. Үүний нэг нь бөөмцөрийн механик шинж чанарыг бодит хугацаанд нь хэмжиж чаддаг. Нөгөө талаас хөвөгч бөөмцөрийн хэмжээг тогтоож чаддагаараа онцлогтой.

Ашигласан материал

- [1] M.A.Liberman, “Introduction to Physics and Chemistry of Combustion”, Springer-Verlag, (2008).
- [2] J.Warnatz, et. al., “Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation”, Springer, 4th ed., (2006).
- [3] K.S.Sajwan, et. al., “Coal Combustion Byproducts and Environmental Issues”, Springer Science+Business Media, Inc., (2006).
- [4] P.Lu et al, Journal of Hazardous Materials, 199–200, 272–281, (2012)
- [5] P. G. Satsangi, Int. J. Environ. Sci. Technol. 11, 217–232 (2014)
- [6] Sadezky et al., Carbon, 43, 1731–1742, (2005)
- [7] J.Vanchinkhuu et al, Вестник Бурятского Государственного Университета: Химия. Физика, Вып. 2-3, 18-25, (2016).
- [8] T.J.Johnson, et al, Journal of Aerosol Science 75, 9–16 (2014).
- [9] M.W.McElroy et. al, Science vol 215, iss. 4528, 13-18, (1982)
- [10] C. Ehrlich et al., Atmospheric Environment, 41, 6236–62548 (2007)
- [11] P.Chylek, et al, Applied optics, 20, No. 17, 1, (1981)
- [12] M. Schnaiter et al., Journal of Aerosol Science, 34, pp. 1421–1444, (2003)