

Kutatási tevékenységünk az üreghanggal kapcsolatban

Munkánkat az üreg feletti 2D áramlás szimulációinak numerikus paramétertannalányáival kezdtük. Ebben a szakaszban állapítottuk meg azokat az optimális numerikus paraméterértékeket, amelyek már számunkra elég pontos megoldást biztosítanak, de még elfogadható marad a szimuláció futási ideje. Külön-külön végeztünk vizsgálatokat az időlépés, a konvergenciakritérium, számábrázolási pontosság optimális értékeinek meghatározására. Különös gondossággal elemeztük a végeselemes háló struktúrájának és sűrűségének hatását az eredményekre, valamint megállapítottuk üreget körülvevő áramlási tartomány elégséges méretét. A többségében lamináris modellel futtatott szimuláció mellett kipróbáltunk többféle turbulens modellt is.

Következő lépésként elvégeztük a fizikai paramétertannalányokat. Itt a három legfontosabb fizikai körülmény hatástanalányát készítettük el. Megvizsgáltuk hogyan befolyásolja az üreg belépő éle feletti határreteg vastagság a nyíróréteg instabilitását, hogyan változik az áramkép és a nyíróréteg lengésfrekvenciája a sebesség változtatásakor, illetve milyen befolyása az üreg hossz-mélység arányának az áramlás minőségi és mennyiségi jellemzőire. A szimulációk során az üreg mélysége minden esetben 5 mm , az üreg hossza pedig általában 10 mm volt, de a hossz-mélység arány vizsgálata során az üreghossz 5 és 20 mm között változott. A (lamináris) határreteg vastagsága $0,81$ és $1,83\text{ mm}$ között változott, tipikus értéke $1,22\text{ mm}$ volt. A megfújási sebességre vonatkozó paramétertannalány során kiderült, hogy a minket érdeklő jelenségek a 15 és 42 m/s közti tartományban fordulnak elő.

A fenti elemzések elvégzéséhez a kereskedelmi forgalomban kapható szoftverek mellett célszerű volt néhány speciális probléma megoldásához saját programokat írni. A lamináris határretegekre jellemző, paraméterezhető, belépő Blasius sebességprofil előállítását egy általunk írt MatLab program végezte. A spektrális analízishez és a hullámterjedési sebesség méréséhez szükséges adatok kimentését saját ANSYS CCL scriptek segítségével oldottuk meg. A spektrális analízis támogatásához pedig MatLabban implementáltunk kisebb programokat.

A kapott eredményeket összehasonlítottuk más - az irodalomban fellelhető - hasonló szimulációk és kísérletek eredményeivel, valamint a Rossiter féle félempirikus képlet által jósolt eredménnyel. A minőségi egyezés mellett megfigyeltünk mennyiségi különbségeket, de ez magyarázható a kísérletek körülményei közti eltérésekkel. Az összehasonlítás érintette nyírórétegben fellépő lengések frekvenciáit, a moduláló frekvenciákat, a kialakuló áramlási képeket és mindezek függését fizikai paramétereiktől.

Ezután az áramlás időfüggő sebességterét két különböző módszerrel bontottuk komponensekre. A POD (Proper Orthogonal Decomposition) felbontást MATLAB és ANSYS CCL segítségével valósítottuk meg. Az itt nyert tapasztalatokat a későbbiekben az attraktor rekonstrukciókhoz kívánjuk felhasználni. A másik felbontás trigonometrikus Fourier-komponensek szerint történt. Ennek segítségével megfigyelhetővé vált a vizsgálat tárgyát képező alacsony frekvenciás komponensek megjelenése, valamint térbeli és időbeli terjedése.

A fent vázolt átfogó fizikai paramétertannalányok tapasztalataira építve, egy rögzített határretegvastagság és üregeometria mellett megismételtük a megfújási sebességre vonatkozó paramétertannalányunkat finomított beállításokkal 10 mm -es üreghossz és $1,22\text{ mm}$ -es határretegvastagság mellett. Ebben elkülönítettünk egymástól két minőségileg különböző sebességtartományt, amelyet egy (harmadik) átmeneti tartomány választ el egymástól. Az átmeneti tartomány 32 és 36 m/s közé esett. Megmutattuk, hogy az átmeneti tartományban kétféle viselkedés (módus) valósulhat meg időben váltakozva, egymást kizáró

módon. Bemutattuk, hogy egyik tartományból a másikba átlépve hogyan tevődik át a mozgási energia zöme különböző frekvenciasávokba. Kísérletet tettünk az áramlást kialakító mechanizmusok azonosítására; feltérképeztük ezek térbeli elhelyezkedését. Megfigyeltük, hogy ez a térbeli elhelyezkedés milyen különbségeket mutat az egyes sebességtartományokban. Kutattuk, hol lépnek egymással kölcsönhatásba a feltárt mechanizmusok. Az általunk vizsgált körülmények között az üregben két nagy, helyben forgó örvény alakult ki. Megállapítottuk, hogy ezen örvények forgási sebessége az egyes tartományokban hogyan függ a zavartalan áramlási sebességtől. Kiderült az is, hogyan változik meg az örvényen belüli sebességmegoszlás. A nagy örvények forgási sebessége kiemelt jelentőségű a zavarás terjedésének szempontjából is. A nyíróréteg lengésének vizsgálata közben kidolgoztunk egy robosztus módszert a nyíróréteg pillanatnyi helyzetének leírására. Megállapítottuk azt az alakot, ami körül a nyíróréteg időben leng, meghatároztuk az egyes sebességtartományokhoz tartozó lengési amplitúdókat és hullámszámokat.

A fenti megfigyelésekre alapozva a jelenségeket megmagyarázó visszacsatolási mechanizmusok feltárásával folytattuk munkánkat. A szimulációkban kimutattuk az irodalomból is ismert akusztikai visszacsatolást, valamint felfedeztünk egy – az irodalomból általunk nem ismert – új mechanizmust, ami a moduláló frekvenciák jelenléteért felelős. Megkezdjük a mechanizmus működésének részletesebb feltérképezését örvénykövető algoritmusokkal. Az örvénykövetésen kívül kísérletet tettünk a koherens struktúrák azonosítására is.

Az örvénydetektáló algoritmusok közül elsőként a Q-kritérium eredményeit tanulmányoztuk. Megkülönböztetett figyelemmel vizsgáltuk a módszer alkalmazhatósági korlátait. Miután a Q-kritérium egy időben „befagyasztott” áramlás lokálisan lineáris közelítését elemzi, így a mi esetünkben a sebességtér nemlinearitása és időfüggése is korlátozta a használhatóságát. Bemutattuk, hogy az egyes sebességtartományokban az említett korlátozó tényezők hol és milyen mértékben teszik bizonytalanná a Q-kritérium eredményét. Kiderült, hogy jelentős azon esetek száma, ahol a Q-kritériumnál fejlettebb módszerre van szükség. Az irodalomban fellelhető többféle továbbfejlesztési irány közül mi a Hua és Klein szerzők által kijelölt úton indultunk el. Mivel az ő megoldásuk csak az instacionaritás szempontjából ad a Q-nál jobb megoldást, tovább javítottunk a módszerükön, úgy hogy a mi kritériumunk már térben is magasabb rendű közelítést szolgáltatson. Ezzel a módszerrel kijelöltük térben és időben az örvénymagoknak tartott területeket. Az örvénymagban várakozásaink szerint lokálisan nem távolodnak egymástól exponenciálisan a részecskepályák. Így az örvénymag kereséssel komplementer vizsgálat a hiperbolikus helyek keresése, ahol a részecskepályák egymástól lokálisan exponenciálisan távolodnak. Ezeket a helyeket egy Haller György által a közelmúltban kifejlesztett módszerrel kerestük, és a kapott eredményeket összevetettük az örvénydetektálás eredményeivel.

Az áramlás által keltett zaj meghatározásához egy irányban kapcsolt áramlástan-akusztikai szimulációkat futtatunk, a klagenfurti egyetemmel kooperálva. A zajkeltéshez Lighthill módszerét felhasználva az eddigi áramlástan-akusztikai szimulációkból számoltunk akusztikai forrástagokat, majd ezek segítségével futtatunk mind harmonikus mind tranziens akusztikai elemzést. Így a korábban ismertetett módusokat akusztikai szempontból is összehasonlítottuk egymással és Howe elméleti eredményeivel.

Elmélyedtünk az üreg feletti áramlás dinamikai vizsgálatában is, melyhez káoszelméleti eszközöket is alkalmaztunk. Megvizsgáltuk, milyen változókból érdemes az attraktort rekonstruálni. Implementáltunk az attraktor rekonstrukcióhoz, és azok elemzéséhez szükséges kódrészleteket. A módszerünket felkészítettük olyan esetekre is, amikor egy mérésből származó skalár adatsor áll csak rendelkezésre a dinamikai elemzéshez. A megoldott részfeladatok az időeltolások technika során alkalmazott időlépés kiválasztása, fraktáldimenzió meghatározása, valamint a globális és lokális maximális Ljapunov-

exponensek meghatározása. A szimulációból származó jelek tanulmányozása során arra jutottunk, hogy lényegesen hosszabb időjelre van szükség annál, mint amit szimulációval reális idő alatt elő tudunk állítani, így az itt kifejlesztett technikák felhasználását elhalasztottuk a mérőberendezésükből származó (mért) időjelek elemzéséig.

Megterveztünk és megépítettünk egy mérőberendezést, amely az üreg feletti áramlás tanulmányozására alkalmas. A laborunk adottságainak figyelembevételével a szimulált esetek dimenziótlan bemenő paramétereivel való illeszkedést biztosítottuk. Az üreg egy plexiből készült nyílt felszínű csatornában kapott helyet, ezáltal az optikai ráláthatóság biztosított. Eddig lézer Doppler anemométerrel és nyomáskülönbség-távadóval végeztünk próbaméréseket. A kapott eredmények elemzése alapján meghatároztunk a mérőberendezés szükséges módosításait, melyek kivitelezése folyamatban van.

A szimulált esetekkel való dimenziótlan illeszkedés igénye azt eredményezte, hogy igen kis amplitúdójú nyomásingadozást kell mérnünk az infrahang frekvenciatartományában. Ez komoly mérés technikai kihívás elé állított minket, egyúttal elengedhetlenné tette a megépített nyomásmérő-nyomásközvetítő rendszer átviteli tulajdonságainak ellenőrzését. Az ellenőrzést egy külön erre a célra megépített kalibráló berendezésen végezzük. Ez a kalibráló berendezés egy légmentesen záródó - félig vízzel töltött - hordóból ennek tetejébe épített hangszóróból a hangszóró pozícióját detektáló optokapukból, valamint a hangszórót vezérlő (egyéni le tervezett és összeállított) elektronikából és szoftverből áll. (A szabványos audio eszközök használatára az alacsony frekvencia miatt nem volt lehetőség.) A kalibráló berendezés a hangszóró ellenőrzött amplitúdójú és frekvenciájú mozgása által egy elméletileg ismert mértékű nyomásingadozást hoz létre a mérőtérben, amivel a nyomástávadó jele összevethető. A kalibráló berendezés birtokában megnyílt az út egy elfogadható átviteli tulajdonságokkal rendelkező nyomásmérő rendszer megalkotására. A kezdeti konfigurációk nem voltak alkalmasak a minket érdeklő frekvenciasáv egészének mérésére, így a berendezésnek ezt a részét átterveztük a korábbi tapasztalatok figyelembevételével.

A lézer-Doppler anemométerrel kapcsolatos mérés technikai problémákat elhárítottuk, ezzel a technikával jó minőségű, tetszőleges hosszúságú jel rögzíthető.

A publikációk közül különösen a Physics of Fluids c. folyóiratban megjelent cikkünket emelem ki. A Physics of Fluids az áramlástan szakma egyik legnagyobb presztízsű folyóirata; a Műegyetemről eddig még soha senkinek nem sikerült itt publikálnia. Ennek a cikknek a súlya remélhetőleg ellensúlyozza a cikkek számának viszonylag kis voltát.

Kutatási tevékenységünk az élhanggal kapcsolatban

Ennek a résznek a jelentősége abban áll, hogy azt az aeroakusztikai módszertant dolgoztuk ki, ami az üreghangra is átvihető, illetve amit részben át is vittünk.

1) Módusváltások, hiszterézis

Ahogy az élhangelő főbb paramétereit változtatjuk, bizonyos paraméter értékeknél az élhangelő egyik módusból a másikba ugrik. Ugyanakkor bizonyos paraméter értékeknél megfigyelhető, hogy az élhangelő külső beavatkozás (paraméter-változtatás vagy gerjesztés) nélkül ugrik át egyik módusból a másikba. Ez az ugrás lehet permanens (egyirányú) vagy átmeneti (az élhangelő a két módus között oda-vissza ugrál, „mode switching”). Parabolikus sebességprofilú szabadsugár esetén hiszterézis is megfigyelhető: a módusváltás nem ugyanannál a paraméter értéknél következik be a paraméter kis értékről való növelése esetén, mint nagy értékről való csökkentése esetén.

A módusváltásokat mozgó ablakos Fourier transzformációs technikával detektáltuk a kísérletek esetén a mért nyomásjelből illetve a CFD szimulációk esetén egy rögzített pontbeli nyomásjelből vagy az ékre ható erő időjeléből. Ennek lényege, hogy a teljes időjelnek csak egy rövidebb részére ("ablakon") számoljuk ki a spektrumot FFT-vel és ennek az ablaknak a helyét a jel elejétől a végéig mozgatjuk bizonyos lépésközzel. Így jól megfigyelhető ha a teljes időjel egy pontján kvalitatív változás áll be.

A laboratóriumi kísérletek során a környezet kiküszöbölhetetlen minimális zavarásai a módusváltások határán már elégnek bizonyulnak ahhoz, hogy az élhangot a két módus között oda-vissza kapcsolják. Numerikus szimulációk ebből a szempontból sokkal tisztábbak, ott nincsenek "környezeti zavarások" a numerikus zaj pedig kevésnek bizonyult ahhoz, hogy a módusok közötti oda-vissza ugrálást előidézze. A mérésekhez viszonyítva a CFD szimulációk ezért valamivel kevésbé színes képeket mutatnak.

Példaként bemutatva a módusváltásokat kísérleti eredményeken:

A 10 mm-es fúvóka-ék távolság és parabolikus sebességprofil esetén a megfújási sebességet (amit dimenziótlan formában, a Reynolds számmal jellemezünk) növelve a következő megfigyeléseket tettük (zárójelben a jelen lévő módusok sorszáma):

- (1) $Re = 85$ érték környékén kialakul az élhang első módusa
 - (2+1) $Re = 180$ érték környékén a második módus megjelenik az első módus mellett
 - (2) $Re = 380$ érték környékén az első módus elhal és tiszta második módus figyelhető meg
 - (3+1) $Re = 650$ körül a harmadik módus megjelenik amivel egyidőben a második módus eltűnik és az első újra megjelenik
 - (3) $Re = 950$ körül az első módus újra eltűnik, a tiszta harmadik módus figyelhető meg
- Innen csökkentve a megfújási sebességet a felsorolás visszafele játszódik le szinte megegyező határokkal.

Egyetlen ám nagyon is jelentős különbség egy hiszterézis jelenség: a (3+1) módusból közvetlenül a (2+1) módusba ugrik az élhang, kihagyva a tiszta (2) módust.

Ezen a téren elért eredményeinket a MURPHYS Workshopon és az ICSV'17 konferencián mutattuk be először. A MURPHYS Workshop után az ott bemutatott eredményeink kibővített változatát a Journal of Physics – Conference Series folyóiratban publikáltuk.

2) Akusztikai szimulációk

A hibrid CAA (Computational AeroAcoustics – numerikus aeroakusztika) módszerek többsége egyirányú csatolást alkalmaz, mivel az áramlás által keltett akusztikai tér nincs visszahatással az áramlásra. Így tehát első lépésként egy CFD (Computational Fluid Dynamics – numerikus áramlásszimulációs) programmal számolják az áramlási teret és ebből megfelelő Lighthill típusú analógia alapján az akusztikai forrástagokat. Ezeket a forrástagokat felhasználva, az inhomogén hullámegyenletet megoldva számolható ezután egy akusztikai programmal az akusztikai tér, ami a legtöbb esetben a CFD tartománynál határozottan nagyobb. A hibrid módszerek legnagyobb erőforrás-igényű része többnyire a CFD szimuláció.

A két külön szoftver közötti kapcsolás okán eddig a CFD szimulációt akkor is teljes 3D-ben kellett elvégezni, ha az jellegét tekintve síkáramlás, azaz a tér egyik irányában a sebességvektorok komponensei nullák illetve ebben az irányban a sebességek nem változnak. Ugyanakkor egy síkáramlás teljes 3D CFD szimulációja nagyságrendileg nagyobb erőforrást igényel, mint a síkáramlás tulajdonságait felhasználó 2D CFD szimuláció.

Klagenfurti partnereinkkel együtt kifejlesztettünk egy módszert, amivel síkáramlás akusztikai tere 2D CFD és 3D akusztikai szimulációk összekapcsolásával határozható meg: 2D CFD

szimuláció geometriáját és eredményeit a harmadik dimenzióba extrudáljuk, és behelyezzük a 3D akusztikai térbe. Ehhez írtunk egy szkriptet, ami az 1 mm magas, egy rétegű hálón végzett élhang CFD szimulációból számolt akusztikai forrástagokat egy tetszőleges vastag élhangnak megfelelő akusztikai forrássá extrudálja és skálázza. Megmutattuk, hogy megfelelő skálázással az akusztikai tér szinte független attól, hogy a forrástagokat hány rétegben másolom egymás fölé, így akár az is elég, ha csak a legalsó rétegen vannak forrástagok. Így a 3D akusztikai számításához szükséges háló nagymértékben leegyszerűsödik (nincs szükség az extrudálás miatt indokolt rétegelt részre a háló alján) és csökken annak elemszáma is. Egy „virtuális” 25 mm magas szabadsugarú élhang konfiguráción végrehajtva a 2D-3D kapcsolást és ezt összehasonlítva egy tényleges 25 mm magas 3D CFD szimulációval elvégzett 3D-3D kapcsolással a különbség mindössze 1%. Számítástechnikai erőforrásokat tekintve a 2D CFD szimuláció CPU időigénye a 3D CFD szimuláció nyolcadrésze, és a memóriaigény is a tizedrészére csökkent. A munkáról cikk készült, amit impakt faktoros folyóiratba adtunk be. Az első bírálati fordulón vagyunk túl.

3) Orgonalábban kialakuló speciális élhang jelenség vizsgálata

Az élhang gyakorlati alkalmazásaként stuttgarti kutatók által végzett orgonaláb-mérésekhez készítettünk áramlásszimulációkat. Először a felső ajak nélküli konfigurációban kialakuló szabadsugarú CFD szimulációját készítettük el. Sebességprofilját, középvonalát és saját természetes instabilitásából adódó lengését vizsgáltuk és találtunk jó egyezést az irodalomban található eredményekkel illetve a stuttgarti kutatók kísérleti eredményeivel. Ezután különböző felső ajak pozíció mellett vizsgáltuk az áramlást. Megállapítottuk, hogy amennyiben a felső ajak a szabadsugarú középvonalától távol van, úgy nem alakul ki élhang jelenség, a szabadsugarú a felső ajak egyik oldalán saját természetes instabilitása miatt oszcillál. Ha a felső ajak a szabadsugarú középvonalához közel van, akkor kialakul az élhang jelenség és a legerősebb és leginkább stabil élhang oszcillációt – és ezáltal a legerősebb és legstabilabb hangképzést – akkor kapjuk, ha a felső ajak a szabadsugarú középvonalában van. Ez az eredmény egybeesik a stuttgarti kutatók kísérleti eredményével. A munkáról cikk készült, amit impakt faktoros folyóiratba adtunk be.