



Budapest University of Technology and Economics



Department of
Hydrodynamic
Systems

Kapcsolt aeroakusztika számítások

Vaik István

BME-HDR

Miről lesz szó?

- 1 Aeroakusztika, Áramlás-Akusztika kapcsolat
- 2 Egy kapcsolt hibrid szimuláció lépései
- 3 Lépésről lépésre - az Élhang példáján keresztül

DNS - Direct Noise Simulation

Direkt akusztikai szimuláció

- Akusztikai hullámok = (nagyon kis amplitudójú) nyomáshullámok \Rightarrow áramlási jeleség
- Összenyomható Navier-Stokes egyenletek ezt is leírják
- Miért ne végezzünk összenyomható N-S szimulációt az akusztikai vizsgálatokra (Direct Noise Simulation)?

Miért ne végezzünk DNS szimulációt? Mert bonyolult

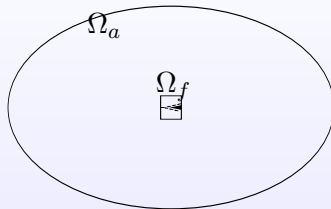
- alacsony Mach szám – összenyomhatatlan \Leftrightarrow akusztika per definíció összenyomható
- több nagyságrend különbség van áramlási és akusztikai fluktuációk között; pl.:
 - 1 m/s áramlási fluktuáció nem különösebben jelentős \Leftrightarrow 80 db hanghullám akusztikai sebességfluktuációja 0,5 mm/s
 - emberi hallásküszöb (1 kHz) értéke $SPL = 0$ dB, ami $20 \mu\text{Pa}$

DNS - Direct Noise Simulation

Miért ne végezzünk DNS szimulációt? Mert bonyolult

- nagy pontosságú numerikus módszerekre van szükség, hogy a numerikus hiba az akusztikai mértékek alatt legyen
- áramlási jelenségek szimulációjánál a térbeli felbontást a legkisebb áramlási struktúra határozza meg míg akusztikai vizsgálatnál a hullámhossz; pl.: (egy konkrét) orgonasípban kialakuló áramlásban a legkisebb struktúra ≈ 1 mm méretű \Leftrightarrow gerjesztett hang frekvenciája 161 Hz $\rightarrow 2,13$ m
- Áramlás szimulációhoz szükséges időlépés (CFL kritérium) nagyságrendekkel alacsonyabb mit az akusztikához szükséges
- CFD peremfeltételek többnyire nem akusztikailag elnyelőek

Hibrid módszer



Ha nem DNS, akkor hogyan? – Hibrid módszerrel!

- Tipikusan az akusztika nem hat vissza az áramlásra!
⇒ Válasszuk szét a kettőt!
- CFD szimuláció csak egy kis, Ω_f területen
- Akusztikai forrástagok kiszámítása a CFD eredményből
pl.: **Lighthill analógia** + kiterjesztései (Curle, Ffowcs-Williams-Hawkings); Powell
örvény-hang elmélete (vortex-sound theory) és továbbfejlesztése (Howe)
- Akusztika a teljes Ω_a tartományban a CFD-ből származó forrástagokkal

Lighthill analógia és az inhomogén hullámeqyenlet

Összenyomható Navier-Stokes egyenletek

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial \rho v_i}{\partial x_i} = Q \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \rho v_i v_j}{\partial x_j} = F - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (i = 1 \dots 3) \quad (2)$$

Referencia állapot: ρ_0, p_0, c_0 (hangsebességgel)

Ettől való eltérés: $\rho' = \rho - \rho_0$ és $p' = p - p_0$

$$\frac{\partial(1)}{\partial t} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial(2)_i}{\partial x_i} - c_0^2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2}$$

Lighthill analógia és az inhomogén hullámeqyenlet

$$\frac{\partial(1)}{\partial t} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial(2)_i}{\partial x_i} - c_0^2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2}$$

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_0^2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \rho v_i v_j}{\partial x_i \partial x_j} =$$

$$= \frac{\partial Q}{\partial t} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial F_i}{\partial x_i} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} - c_0^2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2}$$

Átrendezve (legyen $Q = 0$ és $F = 0$; $\rho = \rho_0 + \rho'$ és $p = p_0 + p'$):

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \rho v_i v_j}{\partial x_i \partial x_j} + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 (p' - c_0^2 \rho')}{\partial x_i^2} - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 \tau_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

Lighthill analógia és az inhomogén hullámeqyenlet

Inhomogén hullámeqyenlet

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

Lighthill Stress Tensor

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + ((p - p_0) - c_0^2 (\rho - \rho_0)) \delta_{ij} - \tau_{ij}$$

Lighthill analógia és az inhomogén hullámegyenlet

Egyszerűsítések

- izentropikus áramlásokra ahol p'/p_0 és ρ'/ρ_0 nagyon kicsi (általában igaz), $p' - c_0^2 \rho'$ elhanyagolható
- Akusztikai energia viszkozitás okán hőenergiává válása nagyon lassú és csak nagy távolságoknál van jelentősége $\Rightarrow \tau_{i,j}$ -s tag elhanyagolható
- $T_{ij} \approx \rho v_i v_j$ megfelelő közelítés

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 \rho v_i v_j}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 \rho v_i v_j}{\partial x_i \partial x_j}$$

Lighthill analógia és az inhomogén hullámeqyenlet

Inhomogén hullámeqyenlet

Lineáris (hiperbolikus, pde):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \sum_i \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} = f$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - c_0^2 \sum_i \frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} = g$$

$$\frac{\partial^2 (u + v)}{\partial t^2} - c_0^2 \sum_i \frac{\partial^2 (u + v)}{\partial x_i^2} = f + g$$

Átírás idő tartományból frekvencia tartományba

Inhomogén hullámmegyenlet

Lineáris (hiperbolikus, pde):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \sum_i \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} = f$$

Legyen u és f Fourier sorfejtése a $t \in [0; T]$ tartományon:

$$u(t, x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{u}_n(x) e^{i \frac{2\pi}{T} n t}, \quad \hat{u}_n(x) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t, x) \cdot e^{-i \frac{2\pi}{T} n t} dt$$

$$f(t, x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{f}_n(x) e^{i \frac{2\pi}{T} n t}, \quad \hat{f}_n(x) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t, x) \cdot e^{-i \frac{2\pi}{T} n t} dt$$

Átírás idő tartományból frekvencia tartományba

Ekkor a hullámegyenlet bal oldala:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c_0^2 \sum_j \frac{\partial^2 u}{\partial x_j^2} &= & u(t, x) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{u}_n(x) e^{i \frac{2\pi}{T} n t} \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{u}_n(x) \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(e^{i \frac{2\pi}{T} n t} \right) - c_0^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_j \frac{\partial^2 \hat{u}_n(x)}{\partial x_j^2} e^{i \frac{2\pi}{T} n t} \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{u}_n(x) \frac{\partial}{\partial t} \left(e^{i \frac{2\pi}{T} n t} \cdot i \frac{2\pi}{T} n \right) - c_0^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_j \frac{\partial^2 \hat{u}_n(x)}{\partial x_j^2} e^{i \frac{2\pi}{T} n t} \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{u}_n(x) \cdot e^{i \frac{2\pi}{T} n t} \cdot (-1) \frac{4\pi^2}{T^2} n^2 - c_0^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_j \frac{\partial^2 \hat{u}_n(x)}{\partial x_j^2} e^{i \frac{2\pi}{T} n t} \\
 &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i \frac{2\pi}{T} n t} \left(-\hat{u}_n(x) \frac{4\pi^2}{T^2} n^2 - c_0^2 \sum_j \frac{\partial^2 \hat{u}_n(x)}{\partial x_j^2} \right)
 \end{aligned}$$

Átírás idő tartományból frekvencia tartományba

Tehát a hullámegyenlet:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{i\frac{2\pi}{T}nt} \left(-\hat{u}_n(x) \frac{4\pi^2}{T^2} n^2 - c_0^2 \sum_j \frac{\partial^2 \hat{u}_n(x)}{\partial x_j^2} \right) = f \quad / \cdot e^{-i\frac{2\pi}{T}mt}$$

$$/ \int dt$$

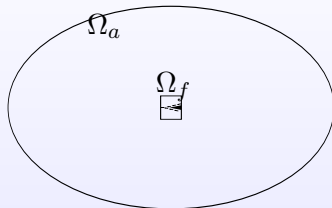
$$/ \cdot \frac{1}{T}$$

$$-\hat{u}_m(x) \frac{4\pi^2}{T^2} m^2 - c_0^2 \sum_j \frac{\partial^2 \hat{u}_m(x)}{\partial x_j^2} = \hat{f}_m(x)$$

$$-k^2 v - \Delta v = g$$

a.k.a. Helmholtz egyenlet

Egy kapcsolt hibrid szimuláció lépései



- 1 elkészítünk egy CFD szimulációt (ANSYS-CFX)
- 2 az elkészült numerikus szimulációból kiszámoljuk a forrástagokat (a CFD háló minden pontján) (CFS++)
- 3 a kiszámolt forrástagokat interpoláljuk az akusztikai háló forrás tartományára (CFS++)
- 4 az interpolált forrástagok spektrumainak kiszámítása (ha frekvencia tartományban számolunk) (MatLab)
- 5 akusztikai szimuláció idő- vagy frekvencia-tartományban (CFS++)

CFD szimuláció

- **háló:**

- tapasztalat, hogy előfordulhat, hogy a CFD szimuláció már visszaadja az áramlást, mégis az akusztikai szimuláció még nem megfelelő eredményt ad.

⇒ A CFD szimulációhoz a szükségesnél jobb háló kellhet.

- A CFX a háló elemeit több particióban tárolja aszerint, hogy azok milyen típusúak. Több partició esetén viszont a forrástagot számoló program megbolondul.

(Itt van még mit fejleszteni a kódon...)

- **pre:** tranziens szimuláció, időlépés megfelelő megválasztása, turbulencia modellezés nélkül, sűrűség állandó - az ANSYS-CFX-ben a peremfetételek nem akusztikailag elnyelők, így kompresszibilis áramlás esetén korlátozott mértékben használhatóak csak...

- **solve**

CFD szimuláció

- **post:** bonyolultabb áramlásnál nem feltétlenül "szép" az áramlás a teljes szimuláció alatt (különböző módusok ki/be kapcsolódása, különböző frekvenciák nemlineáris szuperpozíciója).

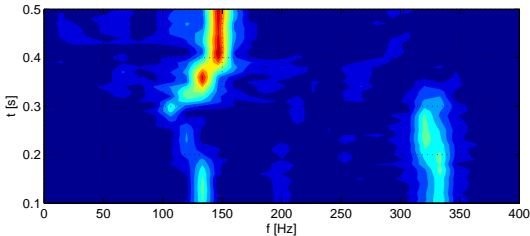
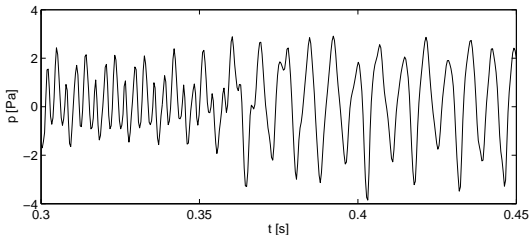
Meg kell találni azt a részt, ahol az áramlás a vártnak megfelelően szépen periódikusan viselkedik.

Erre módszer a "sliding window fourier transformation":

- A teljes T [s] hosszú időjelnek, csak egy τ [s] részéből képezzük a spektrumot t_0 [s] időponttól kezdve.
- t_0 -t $\Delta\tau$ -val csúsztatva 0-tól $(T - \tau)$ -ig kapunk egy teljes spektrum sereget
- amit például úgy ábrázolhatunk, hogy egy kontúrrajz x tengelyén legyen a frekvencia, y tengelyén a t_0 és a színkód az amplitudó.

CFD szimuláció

Példa - Élhang módusváltás $Re = 250$ -nél



Forrástag számítás

Lighthill Stress Tensor

Hullámegyenlet jobboldala: $\sum_i \sum_j \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$, ahol

$$T_{ij} = \rho v_i v_j + ((p - p_0) - c_0^2 (\rho - \rho_0)) \delta_{ij} - \tau_{ij} \approx \rho v_i v_j$$

Forrástag számítás

Ezt kell kiszámolni minden időlépésre és minden pontra. Tehát a CFD szimuláció minden időlépésében le kell tárolni a teljes sebesség mezőt. (összenyomhatatlan közeg - sűrűség állandó)

Forrástag számítás

CFS++: acouRhsLoad

Az inhomogén hullámegyenletből a VEM-rel kapott egyenletrendszer jobboldali vektora.

Ez egy integrálmennyiség, T_{ij} tenzorból + véges elemek bázisfüggvényeiből számolódik.

Tfah, egész térben homogén azonos fázisú forrásunk van. Ekkor:

- nagy elem - sok forrást takar le - integrál egy elemre koncentrálva - nagy acouRhsLoad érték
- kis elem - kevés forrást takar le - integrál egy elemre koncentrálva - kis acouRhsLoad érték
- sok kis elem összege felér a nagy elemmel...

Tehát nem azt kell nézni, hogy hol mekkora az acouRhsLoad, hanem az elem méretéhez viszonyítva mekkora az acouRhsLoad.

Interpoláció

- A CFD hálón kiszámolt forrástagokat interpoláljuk az akusztikai hálóra.
- Konzervatív interpoláció: az összeg megmarad (Vs. az integrál megmarad - nyomás interpoláció bizonyos FSI típusoknál)
- Ahol CFD-ben hirtelen változik az `acouRhsLoad` ott legyen sűrű az akusztikai háló, akár 1:1 a CFD-vel.
Különben az interpoláció során a közeli ellentétes fázisú forrástagok 0-vá összegződnek.

Akusztikai háló

Elemméret az áramlási részen: ahogy az áramlásból számolt forrástagok indokolják. Néhol szükséges a CFD-nél egyik irányban sem nagyobb elem is.

Elemméret a távotérben: $\lambda/20$

rajz - #1 – interpoláció elmosásról

Akusztikai szimuláció: idő tartomány kontra frekvencia tartomány

- Peremfeltétel: akusztikailag elnyelő perem kell a tartomány szélére
- Idő tartományban: ez az "absorbing BC" nem működik teljesen jól, valamennyi visszaverődés mindig van - nagyon nagyra választva a tartományt a visszaverődés nem ér vissza a peremtől a vizsgálni kívánt részhez.
- Frekvencia tartományban: PML (Perfectly Matched Layer) technika: az akusztikai tartomány körül egy sávot hozunk létre amin belül az akusztikai hullám amplitudója folyamatosan lecsökken.
Csak frekvencia tartományban működik megbízhatóan (általában már idő tartományban is.); a lapos szögben beérkező hullámokat rosszul kezeli; téglatest alakú tartományt igényel.
- FFT - MatLab

Hogyan kezeljük a síkáramlásokat?

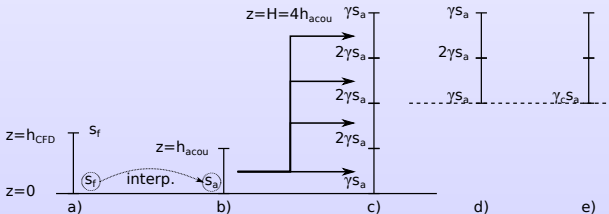
adott (H) magasságú síkáramlás

- CFX: egyrétegű, extrudált háló + szimmetria alul/felül - kevés elemmel számolható egy h_{CFD} szelet
- Forrástagok: 3D-ben lesznek h_{CFD} magasságú áramláshoz, 0 és h_{CFD} magasságban egyenlően szétszétva, azaz mindkét szinten $h_{CFD}/2$ magasságú áramláshoz tartozó forrástag-eloszlás
- akusztika: 2D? 3D?
 - 2D: kevesebb elem, de nehezen értelmezhető a valóságban: más az amplitudó csillapodás; mi a mértékegység?
 - 3D: több elem, skálázás

2D CFD - 3D Akusztika

H magasságú síkáramlás

- Síkáramlás esetén egy tényleges H magas 3D CFD szimulációnál egy h_{CFD} szelet olyan mint egy h_{CFD} magas "2D" CFX szimuláció
- **Ötlet:** Számoljuk ki a forrástagokat a "2D" CFD szimulációból, interpoláljuk az akusztikai hálóra és megfelelően skálázva másoljuk egymás fölé őket
- Az elemszám csökkentése érdekében használjuk ki a szimmetriát az akusztikában is: akusztikában fal peremfeltétel

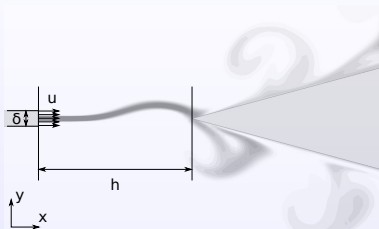


2D CFD - 3D Akusztika

H magasságú síkáramlás

- A falnál extrudált háló kell, hogy egymás fölé másolhatóak legyenek a forrástagok - bonyolult hálóstruktúra, sok elem, nagyon eltérő méretek
- Hogyan függ a távoli akusztikai tér a h_{CFD} CFD háló magasságától illetve az akusztikai hálóban a források szintszámától? - ha $H \ll \lambda$, akkor minimálisan
- Koncentráljuk a forrásokat a szimmetria síkra - nincs gond az extrudált hálóval, teljesen strukturálatlan háló használható, megfelelő minőségű és méretű elemekkel
- Mekkora legyen γ_c skálázási konstans?
 $\gamma_c = H/h_{cfd} \Rightarrow$ források $\gamma_c \cdot h_{cfd}/2 = H/2$ vastag szelethez

Mi az az élhang?



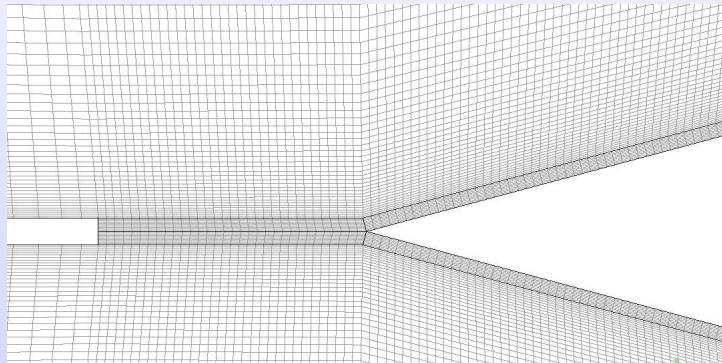
- Sík szabadsugár - ék kölcsönhatás
- Időben állandó peremfeltételek - periódikus oszcilláció
- Periódikus erő az éken
- Dipólus hangforrás - pl.: orgona

Cél: 25 mm magas élhang által generált távoltéri akusztikai mező kiszámítása

Méretek: $\delta = 1$ mm, $Re = \frac{u\delta}{\nu} = 225$ [-]

CFD szimuláció

- $Re = 225 \Rightarrow$ lamináris áramlás, nincs turbulenciamodellezés
- Síkáramlás \Rightarrow 2D szimuláció \Rightarrow egyrétegű (1 mm magas), strukturált háló: 36300 hexa elem
- Fúvóka-ék között nagyon apró elemek
- Lengési frekvencia: $f \approx 130$ Hz



CFD szimuláció - 3D-ben

Valós 3D CFD szimuláció - összehasonlításul

- Geometriai méretek: 25 mm magas szabadsugarú, 70 mm magas ék, $90 \times 151 \times 70$ mm³-es tartomány
- Ugyanolyan peremfeltételekkel, hasonló elemméretekkel ($\approx 550'000$ elem)
- Hasonló áramkép, ugyanaz a lengési frekvencia

Kis f - nagy λ

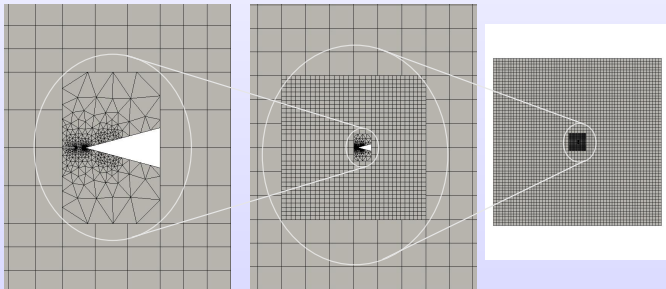
Nagyon eltérő hálóméretek az akusztikai hálóban

- Forrástartományon CFD-hez hasonló elemméretek: 0.05 mm x 0.3 mm a fúvóka és az ék között
- Távoltérben: $f \approx 130$ Hz - $\lambda = \frac{c}{f} \approx 2.6$ m, $\Delta h \approx \frac{\lambda}{20} \approx 130$ mm
- $\frac{130 \text{ mm}}{0.05 \text{ mm}} = 2600$ (!)

Akusztikai háló

Megoldás: összetett akusztikai háló

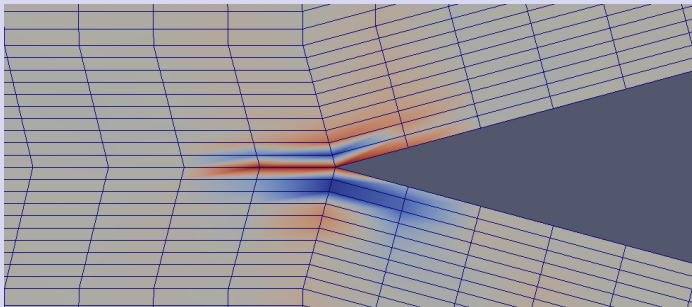
- 1. rész, forrás tartomány: strukturálatlan háló, hálóméret az acouRhsLoad értékeiből adódóan
- 2. rész, "átmeneti" tartomány: strukturált háló
- 3-4. rész, távoli tér és PML tartomány: strukturált háló, $\approx \frac{\lambda}{20}$



Akusztikai háló: forrástagok (acouRhsLoad) vizsgálata

acouRhsLoad

- Az ék csúcsa körül szinte celláról-cellára változik a forrástag előjele
- Az akusztikai háló az ék csúcsa körül legyen 1:1-ben a CFD háló, ha lehet...

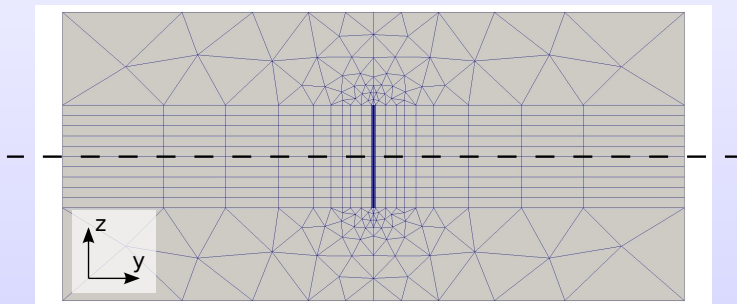


Akusztikai háló: forrás tartomány

- 3D tartomány, de csak "fél tér" visszaverő (fal) peremfeltétellel
- az alsó síkra koncentráljuk a teljes élhang forrástagjait, csak ott kell sűríteni a hálót
- Nagy elem méret különbségek: ék csúcsánál a CFD háló finomsága szükséges (0.05×0.3 mm, hexa), a forrástartomány szélén jóval nagyobb ($\approx 10 - 25$ mm) elemek megengedhetők
- \Rightarrow Strukturálatlan háló
- CFD háló az ék körül: lapos hexák
- Akusztikai háló az ék körül: kis tetraéderek
- \Rightarrow Nem megvalósítható az 1:1 \rightarrow az akusztikai háló itt legyen finomabb mint a CFD háló (!)
- A forrástartomány szélén már nagyobbak az akusztikai háló elemei mint a CFD hálónak

Akusztikai háló: forrás tartomány - a 3D CFD szimulációhoz

- A forrástagok nem koncentráltak, és nem is feltétlenül teljesen szimmetrikusak.
- Nem használjuk ki a szimmetriát sem.
- Az előbbieken túl: a lényeges részen, azaz a szabadsugár magasságában extrudált háló



Akusztikai háló: távotér és PML

- Távotérben és PML-ben $\lambda/20 \approx 130$ mm-es hexa kockák strukturáltak
- Ezek jóval nagyobbak mint a forrástartomány szélén lévő elemek
- Távotér és forrástartomány közé átmeneti rész

Akusztikai háló: átmeneti rész

- A forrástartomány és a strukturált távotér közé még egy tartomány, szintén strukturált hálóval ≈ 35 mm-es elemekkel
- Két NMGI: a méret az átmeneti részen: egyik oldalon 20 – 25 mm-ről 35 mm-re nő (1:1.5) az elemméret; másik oldalon 35 mm-ről 130 mm-re (1:4)

Non Matching Grid Interface - NMGI

- a CFS++ része
- felület két oldalán "elemméret ugrás"; max 5x
- sajnos elég érzékeny a hálóminőségre
- sőt, még ha két jó minőségű háló találkozik is, ha a két háló csomópontjai túl közel vannak egymáshoz, akkor néha rosszul működik

Forrás koncentráció, skálázás - csak a 2D CFD-nél

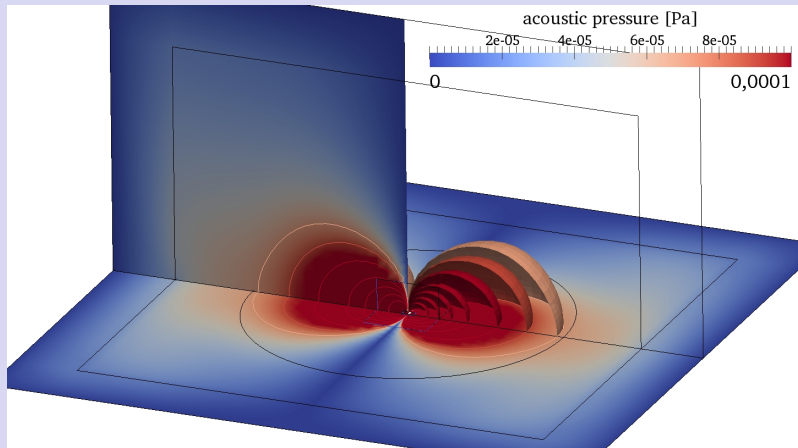
- Cél: 25 mm magas élhang által generált hang távolterének kiszámítása
- CFD: 1 mm magas egy rétegű hexa háló - 2 réteg forrástag
- 1 réteg forrástag 0.5 mm magas élhang által generált hangforrást tartalmaz
- Interpoláljuk az alsó réteget a akusztikai forrástartomány hálójára (3D háló alsó felületére)
- És skálázzuk a 25-szörösére: így a forrástartomány alsó felületén lesz 12.5 mm-nyi élhang hangforrása
- Ami a visszaverő peremfeltétel miatt 25 mm-nyi élhang hangforrásának felel meg

3. FFT, 4. harmonikus akusztikai szimuláció

- FFT - MatLab
- Harmónikus akusztikus szimuláció - CFS++

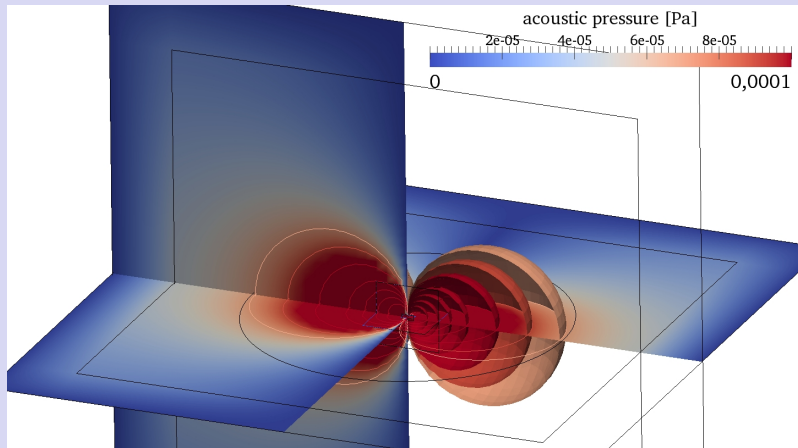
Eredmények a harmonikus szimulációból

2D-3D kapcsolat



Eredmények a harmonikus szimulációból

3D-3D kapcsolat



Eredmények a harmonikus szimulációból

2D-3D Vs. 3D-3D kapcsolat;

$r = 2,6$ m-re az ék csúcsától, a $z = 0$ m síkon

