

Szárny körüli turbulens áramlás numerikus szimulációja nyílt forráskódú és kereskedelmi szoftverrel

Numerical simulation of airfoil with commercial and open source software

NAGY László, egyetemi tanársegéd

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék
1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 4-6., tel.: +36 1 463 3465, fax.: +36 1 463 3464, www.ara.bme.hu
nagy@ara.bme.hu, www.ara.bme.hu/~nagy

ABSTRACT

The flows pasts an airfoil at an angle of attack of 5° , at chord Reynolds number 133 000 and with the assumption of spanwise periodicity was modeled by means of Large-Eddy Simulation using the commercial software ANSYS-FLUENT and open OpenFOAM solver by source GNU General Public License. The streamwise velocity components and velocity fluctuations are validated against in-house Laser Doppler Anemometer and Hot-Wire measurements

ÖSSZEFOGLALÓ

Egy ventilátorokban használatos, 5° -os állásszögben beállított RAF-6E szárnyprofil körül kialakuló, 133 000 Reynolds számmal jellemezhető áramlás kialakulását vizsgáltam, főként a lamináris/turbulens tranzíció vonatkozóan. A numerikus szimulációkat a kereskedelmi forgalomban kapható ANSYS-FLUENT-tel és a Általános Nyilvános Licenc-szel (GNU) bíró OpenFOAM megoldóval a végeztem, melyeket mérésekkel hasonlítottuk össze. A méréseket lézer-doppler anemométeres (LDA) és hődróttal (HWA) validáltuk.

Kulcsszavak: LES, szárnyprofil, hálófüggőség, numerikus séma,

BEVEZETÉS

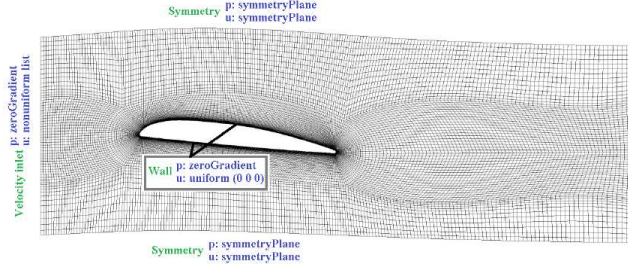
A vizsgálat tárgya egy általában ventilátorokban használt RAF6-E profilú egyenes szárny, melynek vizsgálatát dinamikus Smagorinsky SGS modellel jellemezhető nagy örvény szimulációval (Large-Eddy Simulation) vizsgáljuk. Az 5° -ös állásszögű profil körül kialakuló áramlás 0,2 Mach-val és a szárnyhúrra vonatkozó 133 000 Reynolds számmal jellemezhető. A Reynolds számot a kinematikai viszkozitásra, sebességre és a húr hosszra (100mm) vonatkoztatjuk. Az alacsony áramlási sebesség végett a levegőt összenyomhatatlannak tekinthetjük. A numerikus szimulációkat a kereskedelmi forgalomban kapható ANSYS-FLUENT szoftverrel és a C nyelvben írt függvény csomaggal, OpenFOAM (OF) nyílt kóddal végeztük.

A cellaszámok növekedésével a licence költsége már átlép egy határt, amely anyagilag nem támogatható. Ezért kezdtünk el foglalkozni a GNU licenszettel (GNU Általános Nyilvános Licenc) használó rendszerrel. OpenFOAM legnagyobb előnye, hogy nyílt forráskódú, illetve ingyenes, bárki által letölthető és használható program. Az ANSYS-FLUENT (FLU) kezelő felülete egyszerű, felhasználóbarát, bármilyen operációs rendszeren használható. A geometria kialakításától a szimulációig tartó lépések jól elkülönítettek.

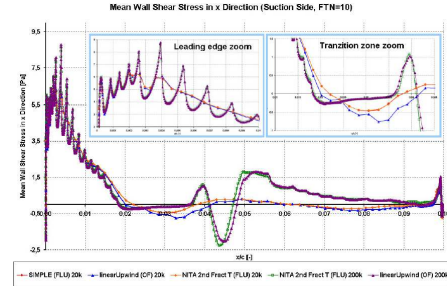
A szárny körüli áramlás kellően részletes kutatott téma. Az általunk érdekes különböző numerikus sémák és hálók eredményeit a [1] tartalmazza. Ennen a cikkben a 2D (OF vs. FLU) tesztelések és a 3D eredményeit foglalom össze.

1. PEREMFELTÉTELEK

A tartományban beállított peremfeltételeket az 1. ábra szemlélteti. A torlópontról 0,5c távolságban elhelyezkedő belépési peremfeltételen beállítottuk a korábbi 2D RANS szimulációjának azonos pozíciójában kiszámolt áramlási sebesség komponenseit, illetve a turbulencia paramétereit. Ezzel az értékkel inicializáltuk a tartományt a szimuláció indításakor.



1. ábra
Tartomány és a peremfeltételek



2. ábra
Áramlásirányába mutató csúsztató
feszültsége [17]

2. AZ ALKALMAZOTT NUMERIKUS MÓDSZER

A nagy örvény szimuláció (LES – large-eddy simulation) a közvetlen numerikus szimuláció és Reynolds átlagolt modellezés előnyeit próbálja ötvözni. Az alap gondolatot és a részletesebb leírásokat a következő cikkekben lehet megtalálni [2], [3], [4], [5] és [7]. A szűrt Navier-Stokes egyenletek felírva az Einstein-féle összegzési konvenciót használva, amely megtalálható [8] munkában is:

$$\partial_i \langle u_i \rangle = 0 \quad (1)$$

$$\partial_i \langle u_i \rangle + \langle u_j \rangle \partial_j \langle u_i \rangle = -\frac{1}{\rho} \langle p \rangle + \nu \partial_j \partial_j \langle u_i \rangle - \partial_j \tau_{ij} \quad (2)$$

Ahol τ_{ij} a háló méret alatti (Sub Grid Scale, rövidítve SGS) feszültség tenzor, melynek neve még azokból az időtől származik, amikor a szűrő azonos volt a numerikus hálóval. Felhasználva az örvény viszkozitás modellt közelíteni lehet a τ_{ij} összefüggéseket:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\nu_t \langle s_{ij} \rangle \quad (3)$$

Az örvényviszkozitást a Smagorinsky modellel [9] modellel szokás közelíteni:

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \langle |S| \rangle \quad (4)$$

$$\langle |S| \rangle = \sqrt{2s_{ij}s_{ij}} \quad (5)$$

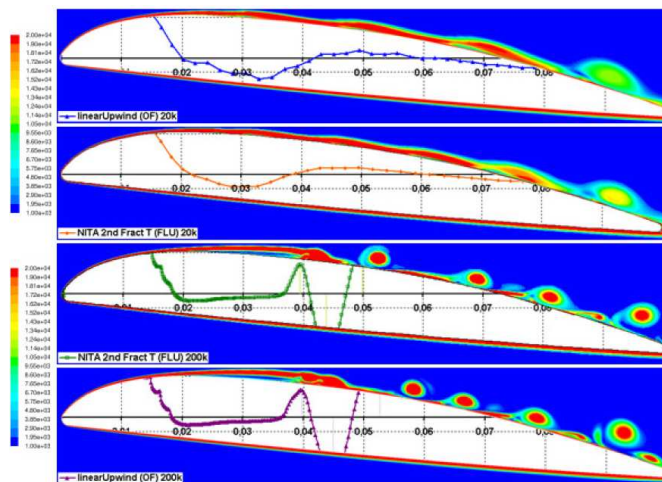
a deformáció egy normája. és C_s az úgynevezett Smagorinsky konstans, mely a modell egyetlen paramétere. Valójában természetesen a Δ is a felhasználó által megadandó paraméter, elvileg a korábbiak alapján az áramlás közelítő ismeretében a 80%-os szabály alapján írjuk elő. Egy részletes leírást lehet találni a Smagorinsky Dynamic Subgrid-Scale örvény viszkozitás modellről [10] és a [11] irodalomban lehet találni.

3. ÖSSZEHASONLÍTÁS

A FLU numerikus szimulációk beállításait meg lehet találni korábbi munkákban [12], [13], [16] és [17]. Általánosságban elmondható, hogy nagyon jó egyezést mutatott a két szimulációs csomag. Az OF esetében sokkal több lehetőségünk van a finombeállításokra, illetve az új solvereket implementálni. A sebesség tekintetében jobb eredményeket értünk el, mert finomítani tudtuk a beállításokat az OF-fal. Mind a két megoldó esetében hasonló oszcillációt vettünk észre a húr hossz-százalékban 15%-ban, amelynek még keressük az okát, ld. 2. ábra. Két hálót vizsgáltunk ebben az esetben, a már említett 200 000 (200k) cellaszámot tartalmazót és a legkisebbet, 20 000 (20k). Ezeket az eredményeket használtuk fel a teljes 3D esetre kibontva. A teljes hálófüggetlenségi vizsgálat megtalálható a [12] cikkben.

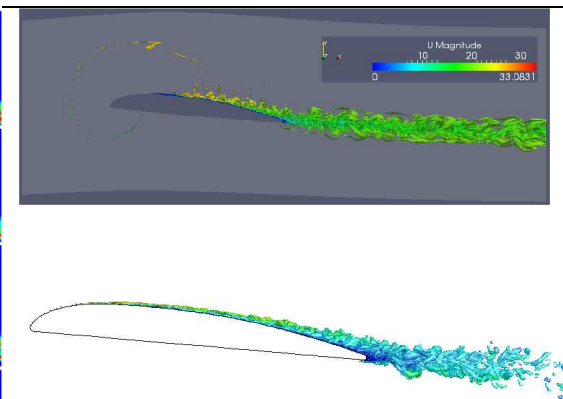
A 3. ábrán egy összetett esetet látni. Felülről felfelé OF kisebb - gyérből hálóból felbontású eset, majd a FLU eredmény látható. A 3-4. eredmény a nagyobb cellaszámú eset mutatja először a FLU majd az OF esetében.

A 2. ábra 0,15c – 0,7c (0,015 – 0,07) szakaszán az áramlás irányú csúszató feszültséget eloszlását látjuk. Kisebb ritkább esetben nagyobb eltérést tapasztalunk, mint a 200k esetén. Ebben az esetben még mindig lehet látni a numerikus oszcillációt a 0.2c húr hossz-százalékban.



3. ábra

A grafikonon a csúsztatott feszültség alakulása. A kontúr ábrán az örvényesség [17].



4. ábra

Sebességgel színezett. Q felületek, fent OpenFOAM [17] eredmény, lent ANSYS-FLUENT [12]

A kontúr ábrák az örvényességet mutatják. Nagyobb eltérést mutat a kisebb és nagyobb cellaszámú eset. Mint a két szoftver esetén, a nagyobb felbontás nagyobb részleteket mutat. Az örvény leválás mind a két esetben ugyanabban a pozícióban történik meg. Az örvényfrekvencia nem minden esetben azonos. Az összes kiértékelésben megvártuk, hogy a kezdeti stationer jellegek megszűnjenek, ez általában 2-3 átfolyás után kialakult, majd még 10 átfolyásban (FTN, *flow through number*) futtattuk a szimulációt.

$$FTN = \frac{t_{flow} U_{ref}}{L} \quad (6)$$

Az aktuális esetben a tartomány 10M (10 000 000) *quad* cellát tartalmaz. Az OF 2.0.0 esetében lehetőségünk van, egy nem szabályos megzavar vinni a belépő peremfeltételre. Az időlépést tartva (a korábbi szimulációhoz képest, $\Delta t = 3,75 \cdot 10^{-7} - 7,5 \cdot 10^{-7} [s]$). Ebben az esetben is stabil szimulációt tudtunk létrehozni. Keresztirányban 50 cellát használunk. Az eddigi kutatások azt mutatták, hogy a tartomány kereszt irányban 0,00625c jobb egyezést mutat az LDA mérésekkel, bár akkor a kialakult örvénystruktúrák nem meggyőzőek. A 0,0125c szélességű tartományban megfelelő eredményeket értünk el. Ezeket fogjuk továbbra is használni.

ÖSSZEFOGLALÁS

Minden a két programban azonos hálóból indultunk ki. Gambit hálózóban készítettük a kezdeti hálókat, majd továbbfejlesztettük az ICEM-mel. A kiértékeléseket a saját felületeken is és a Tecplot szoftverrel is el végeztük. Különbséget nem vettünk észre. Összességében elmondható, hogy nagyon jó egyezést mutatott a két szimulációs csomag sebesség, örvényesség és nyomás tekintetében. Ugyanúgy mint a mérések során, a vizualizációval és a szimulációval minősíteni lehet az eredményeket. A szimulációkat LDA-val és hődróttal [15] validáltuk. A korábbi FLU eredményeket kiegészítettük az OF szimulációkkal. Ellenőriztük a koherens struktúrák (4. ábra) kialakulását is [12], [16] és [17]. Jelen kutatásuk a célja az volt, adott szimulációs esetben összehasonlítsuk a ANSYS-FUENT és az OpenFOAM által szolgáltatott eredményeket. Megállapítottuk, hogy az OpenFOAM ugyanolyan jó eredményeket biztosított, mint az ANSYS-FUENT és a program futási ideje is rövidebb volt.

IRODALOM

- [1] Davidson L, Fröhlich J, Mellen C. LESFOIL: Large Eddy Simulation of Flow Around a High Lift Airfoil Springer, pp.135-147, 201-222, 2003
- [2] Piomelli, U. Large-eddy simulation: achievements and challenges. Progress in Aerospace Sciences, 35, 335-362 1999
- [3] Ferziger, J. H. és Perić, M.. Computational Methods for Fluid Dynamics, Springe 2002
- [4] Sagaut P. Large Eddy Simulation for Incompressible Flows. Springer 2004
- [5] Guerts BJ. Elements of direct and large eddy simulation. Edwards 2004
- [6] Lesier M, Métais O, Comte P. Large-Eddy Simulations of Turbulence. Cambridge University Press 2005
- [7] Sagaut P, Deck S, Terracol M. Multiscale and Multiresolution Approaches in Turbulence. Imperial College Press 2006
- [8] Lohász, Máté Márton Large Eddy Simulation of Heat Transfer in Ribbed Ducts Budapest University of Technology and Economics PhD Thesis 2009
- [9] Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations, i. the basic experiment. Monthly Weather Review, 91: pp 99-164, 1963.
- [10] Germano M. Piomelli U. Moin P, Cabot WH. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model, Physics of Fluids A-Fluid Dynamics, vol 3(7), pp. 1760 - 1765. 1991
- [11] Kim SE. Large Eddy Simulation Using Unstructured Meshes and Dynamic Subgrid-Scale Turbulence Models 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Portland Oregon, 2004
- [12] Nagy L, Rékert T, Lohász M.M. Large-Eddy Simulation in the vicinity of the RAF-6E airfoil in a reduced domain. In: XIX Polish National Fluid Dynamics Conference: KKMP2010. Poznan, Lengyelország, 2010.09.05-2010.09.09. Poznan: pp. 1-9. 2010
- [13] Rékert T, Nagy L, Balczó M, Molnár B. RANS Simulation of RAF6 Airfoil Investigation of the characteristics of the boundary layer over an airfoil. Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06). Budapest, Budapest: pp. 1139-1146. 2006
- [14] Schosser C, Rékert T. Study on wind tunnel effects onto the flow past an airfoil section by means of flow visualization. MicroCAD 2009 conference. Miskolc, 2009
- [15] Berkó Balázs, Nagy László RAF-6E szárnyszegmens szívótt oldali nyom mérése Lézer Doppler Anemométer és hődrót mérés technikával az NPL szélcsatornában április OGÉT 2012-XX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Kolozsvár, Románia 2012.04.19 – 22.
- [16] Nagy László Szárny körül kialakuló áramlás numerikus szimulációja. OGÉT 2010-XVIII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó. Baia Mare, Románia, 2010.04.22-2010.04.25. pp. 310-313. 2010
- [17] Rideg József Large-eddy simulation of airfoil flow using openfoam MSc Thesis 2011

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet illeti Rideg József MSc hallgatót, aki a segített a szimulációk elkészítésekor. Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja. A cikk elkészítését az OTKA K 83807 projektje támogatta. A 10M cellaszám eseteket a szimuláció a Nemzeti Információs Infrastruktúra Fejlesztési Intézet (NIIFI) pécsi klaszterén végeztük.