

INSTACIONÁRIUS LÉGHŐMÉRSÉKLETMEZŐ MÉRÉSI LEHETŐSÉGÉNEK FEJLESZTÉSE

IMPROVEMENT OF MEASUREMENT TECHNIQUES FOR ANALYSIS OF UNSTEADY AIR TEMPERATURE FIELD

Bencs Péter*, dr. Szabó Szilárd**

ABSTRACT

Temperature field measurements around solid bodies (where the temperature of the body is different from the ambient temperature) are particularly difficult when the body is placed in air flow and the velocity and temperature fields are unsteady. The objective of this article is to report on progress made in this research, particularly on our newest results for the two techniques used, standard Schlieren method and Background Oriented Schlieren (BOS) technique.

1. BEVEZETÉS

A termovíziós technika alkalmazásával az utóbbi évtizedben lehetővé vált gépek, berendezések, objektumok (szilárd testek) felületi hőmérséklet-mezejének időben változó nagypontosságú mérésére. A hőforrásként működő testek körüli léghőmérsékletmező mérése viszont e technikával nem lehetséges. A mérés technika egy másik ága a sebességmező mérése már lehetővé teszi e testek körüli akár háromdimenziós időben változó sebességter mérést is (3D PIV (Particle Image Velocimetry)). A léghőmérséklet mérés azonban sokkal nehezebb feladatnak bizonyult. A pontbeli hőmérséklet időben változó mérése már több évtizede megoldott, például a termoelemes, vagy a CTA technika alkalmazásával. E technika segítségével a stacionárius hőmérséklet letapogatásos módszerrel jól rekonstruálható. Egy teljes tér-rész, vagy azon belül egy kiválasztott sík terület – időben változó – hőmérsékletmérésére e technika azonban már nem alkalmas. Az utóbbi évtizedben gyorsult fel e mérés kör megoldásához vezető kísérletek sokasága. Az alapot az optikai elven működő Schlieren technika szolgáltatta, amikor is a léghőmérsékletváltozás okozta sűrűségváltozás mérése a módszer alapja. Az utóbbi évtizedben ötvözve ezt a PIV technika alapjával és szoftverhátterével a BOS eljárás (Background Oriented Schlieren) van terjedőben és hatalmas fejlődésen megy keresztül [1-2].

E cikkünkben légáramlásban elhelyezett hőforrás indukálta hőmérsékletmező megjelenítésére és mérésére végzett fejlesztéseinkről számolunk be.

*egyetemi tanársegéd, **egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke
email: *arambp@uni-miskolc.hu, **aram2xsz@uni-miskolc.hu

2. A SCHLIEREN RENDSZER

2.1. A Schlieren rendszer felépítése

Vizsgálataink első szakaszában az alap Schlieren mérési technikát alkalmaztuk légáramba helyezett fűtött hengeres rúd körül kialakuló hőmérsékletmező szélcsatornában való mérésére. A mérőrendszer és annak működési elve az 1. ábrán követhető. Az alap Schlieren rendszer - a megfelelő minőségű felvételek érdekében - pontbeli fényforrást alkalmaz. A fényforrásból induló fénysugarat az 1. számú tükör irányítja a szélcsatorna mérőterében elhelyezett fűtött henger környezetére. A fénysugár különböző méretű eltérülését okozza a hőmérsékletkülönbség miatt kialakuló légsűrűségváltozás, amely pedig a fénytörési index-változását okozza [1]. A mérőterén áthaladó fénysugár a 2. tükör segítségével fókuszálható egy úgynevezett kés élre. Ennek elsődleges feladata a különböző sűrűségű közegen áthaladt sugarak szabályozása (alapbeállítás szerint a pontbeli fénysugarak felét átengedi a késél). A különböző sűrűségű közegen áthaladó sugarak különböző eltérülése miatt eltérő fényerőséggel világítják meg a késél mögött elhelyezett kamera CCD chipjét. A fényesebb és sötétebb pontok jelölik a pozitív és negatív irányban megváltozott sűrűségű közegen áthaladó sugarakat (késélre merőleges irányban). Amikor a Schlieren rendszer kés éllel működik, akkor tehát a sűrűség megváltozását (gradiensét) határozza meg (a késél irányában).

2.2. A Schlieren számítási eljárás

A sűrűségváltozást a mérőszakaszban a Schlieren tárgy (esetünkben a fűtött rúd) okozza [1,7]. A különböző sűrűségű területeken keresztül haladó sugarak ε fénytörési szöggel térülnek el (y komponensük az ε_y). Az 1. ábra jobb oldali képén látható, hogy az eltérült fénysugarak által a forráskép elmozdul a kés élhez viszonyítva. Az eltérülés mértéke:

$$\Delta a = \varepsilon_y \cdot f_2, \quad (1)$$

ahol f_2 a 2. tükör fókusz távolsága. A ΔE fényerősség változás és a fénytörés ε_y szöge közti összefüggés az alábbi:

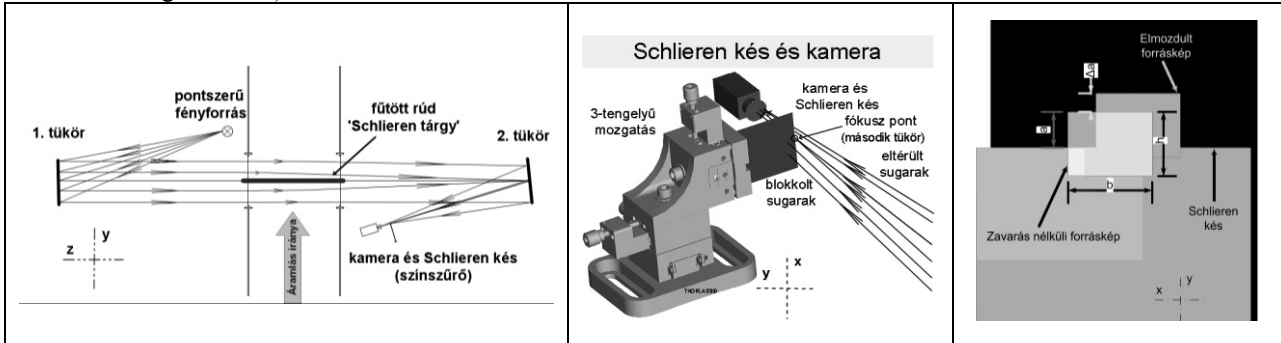
$$\Delta E = \frac{B \cdot b \cdot \varepsilon_y}{m^2 \cdot f_1}, \quad (2)$$

ahol B a fényforrás erőssége, az f_1 az első lencse/tükör fókusztávolsága, az m a nagyítási arány (a mérőtér és a képméret közötti arány) és b a forráskép x irányú szélessége.

A Schlieren képen a kontrasztváltozást meghatározhatjuk a ΔE fényerősség változás és a Schlieren kép háttére E fényerősségének arányával (általában fénytörő közeg nélküli referencia kép készítésével tudják ezt az értéket meghatározni):

$$C = \frac{\Delta E}{E} = \frac{f_2 \cdot \varepsilon_y}{a}, \quad (3)$$

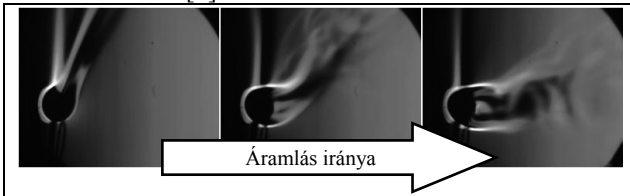
ahol a a forráskép nem blokkolt része, vagyis ami túljut a Schlieren késélen (lásd az 1. ábra jobboldali képen). Schlieren mérés végeredménye egy kontraszt térkép [1]. A mérés bemeneti értékei az eltérült sugarak eltérülési szögei ε , amit a mérőtérben egy átlagos fénysugár fénytörés mutatójának gradiense jellemez.



1. ábra. Z-típusú Schlieren rendszer felépítése és működése

2.3. A Schlieren mérési eredmények

A Z-típusú Schlieren rendszerünk alkalmas hőmérsékletmező megjelenítésére. Megfelelő kalibrálási eljárást alkalmazva a hőmérsékletmező színárnyalataihoz számszerű értékek is rendelhetők. A 2. ábrán a megfűvási sebesség változtatásával ($0 \div 0,3 \text{ m/s}$) jól látható a szabad konvekcióból a kényszerkonvekcióba való átmenet, azaz a fűtött henger körül ennek hatására kialakuló hőmérsékletmező [4].

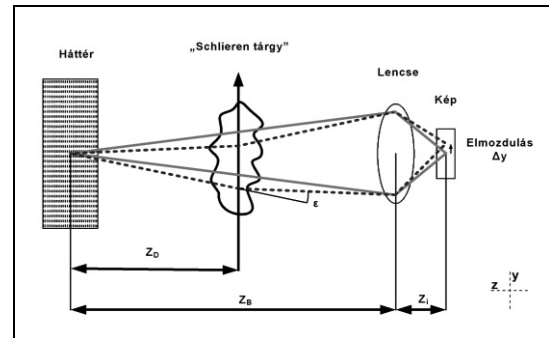


2. ábra. Schlieren kép

3. A BOS MÉRÉSI ELJÁRÁS

3.1. A BOS mérési rendszer felépítése

A BOS technika is a sűrűségváltozás okozta fényelterelésen alapszik, de a mérési módszer alapjaiban más. A BOS mérésekhez szükséges egy, a mérési tér mögé helyezendő megfelelő pontsűrűségű háttér (véletlen eloszlású pontsereg) és egy erre fókuszált kamera [4-6]. A háttér optimalizálása minden feladat első lépése. A cél, hogy a háttéren egy-egy pontra a Schlieren képen 2-3 pixel jusson a CCD kamera chipjén. A mérések során szükség van legalább két kép elkészítésére és tárolására. Az első kép a referenciakép (Schlieren „tárgy” (fénytörést okozó jelenség) nélkül készített felvétel), a második kép pedig a Schlieren „tárggyal” készített, fénytörés melletti felvétel.

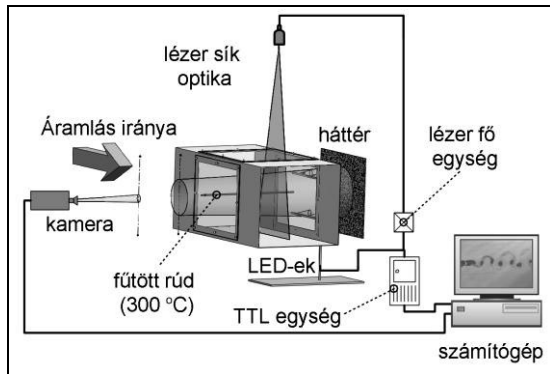


3. ábra. A BOS elv

A 3. ábrán látható a BOS rendszer működése. A fénytörés nélküli esetben a háttér egy pontja az ábrán látható folytonos vonallal megjelenített módon képződik le a kamera CCD chipjén. Fénytörés esetén (Schlieren tárgy) a háttér egy pontja már nem ugyanabba a pontba képződik le a kamera CCD chipjén, mint az előző esetben (pontosított vonal). Amikor a fény keresztülhalad a fénytörést okozó közegen akkor az eredeti irányához képest ε (fénytörési szöggel) eltérül és ennek hatására a kamerában Δy értékkel elmozdulva képződik le. Ebből az elmozdulásból (ami a kamera által készített képen mérhető) meghatározható a sűrűség gradiense. Az elmozdulás mértékét (a kamera által készített képeken) kereszt-korrelációval állapítják meg. A BOS mérés technika általában a PIV (részecske képen alapuló sebesség meghatározás) mérés technikához alkalmazott kereszt-korrelációt használja [6].

A BOS mérések a németországi Magdeburgi Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Intézetében történtek. A vizsgálatokhoz különböző kamerákat, különböző háttereket, azok különböző megvilágítási módszereit és a párhuzamos sebességmérésekhez különböző szinkronizálási technikákat, ködkoncentrációt, stb. próbáltunk ki. A 4.

ábrán a végül alkalmazott mérési felépítés látható, ahol a TTL egység végzi a sebesség és hőmérsékletmérések vezérlését.



4. ábra. A LED-es háttérvilágítást alkalmazó BOS rendszer felépítése

3.2. A BOS számítási eljárás

A számítás alapja az eredeti háttér ponteloszlás és annak a sűrűségváltozás okozta látszólagos elmozdulása. Az ebből – keresztkorreláció segítségével – adódó elmozdulás vektormezőt át kell konvertálni a megfelelő alakba. A számítási eljárás során feltételezzük, hogy az áramlás kétdimenziós, azaz az egész mérési területen a sűrűségváltozás (minden egyes síkban) azonos [6]. Ezen feltevések alapján a sűrűség gradiens két algebrai egyenlet segítségével számítható az elmozdulásból. Az elmozdulás (d) és a fénytörés szöge (ε) közötti kapcsolat:

$$\varepsilon = -(d \cdot h) / z_D, \quad (4)$$

ahol h a pixel fizikai dimenziója a háttér síkján (az elmozdulás pixelben kifejezett értéket alakítjuk át hossz-mértékegységre) és z_D a háttér síkja és a Schlieren tárgy közötti távolság. A sűrűség gradiens és a fénytörés szöge közötti összefüggés:

$$\varepsilon = K \cdot W \cdot \nabla \rho, \quad (5)$$

ahol W a Schlieren tárgy szélessége, K az úgynevezett Gladstone-Dale konstans. A fénytörés mutató (n) és a sűrűség (ρ) közötti kapcsolatot a

$$n = 1 + K \cdot \rho \quad (6)$$

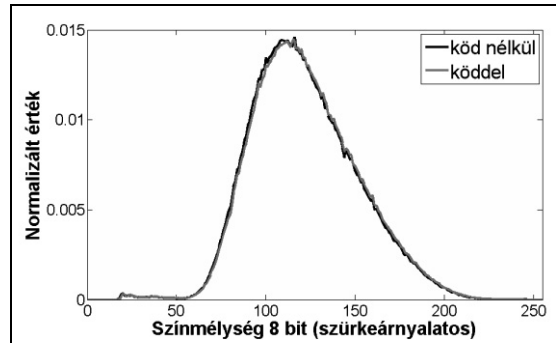
összefüggés írja le.

3.3. A BOS mérés, és annak eredményei

A köd hatása a BOS mérésekre

Fontos meghatározni vajon a BOS mérés technika mennyire érzékeny a PIV mérés során használt olajködre, ha a kettőt párhuzamosan kívánjuk alkalmazni (együttes hőmérséklet- és sebességeloszlás mérés) [6]. Ennek egyik legfontosabb feltétele, hogy a BOS mérés technikát mennyire zavarja meg a PIV technika alkalmazásához a légáramba juttatott olajköd. Az 5. ábrán a 373,15 K hengerhőmérséklet mellett a „nyers” BOS felvételekből készített összehasonlító hisztogramokat lát-

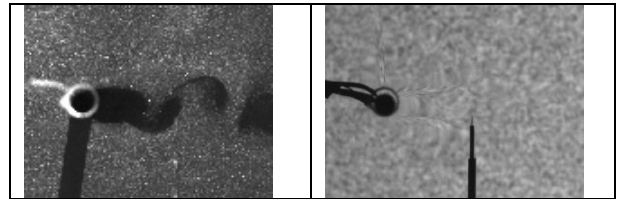
juk köd nélkül és köd alkalmazásakor. A képmérettel normalizált hisztogramok együttfutása jelzi, hogy a ködnek a BOS technikára gyakorlatilag nincs hatása, mert az egyes színárnyalatokhoz tartozó pixelek előfordulási valószínűsége szinte teljesen azonos. Ez azt jelenti, hogy a BOS és a PIV technikák tehát párhuzamosan alkalmazhatók.



5. ábra. A BOS mérések normalizált hisztogramja

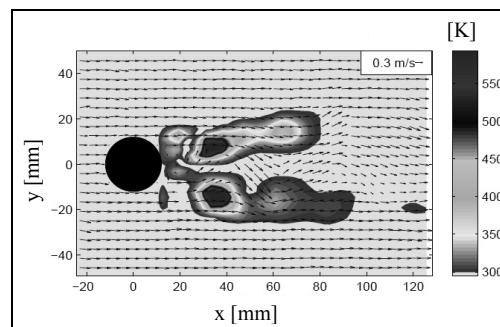
A CTA trigger jel használata

A PIV és BOS mérések egymás után is elvégezhetők. Ekkor valamilyen azonosító jelre van szükség, hogy a henger után leváló örvények azonos pozíciójában készülnjenek a BOS és a PIV felvételek. Erre a henger mögött az örvénysor útjába helyezett CTA szondát alkalmaztunk [6]. Az egymás után, de azonos örvényleválási pozícióban készült nyers sebességmező és hőmérsékletmező képet mutat a 6. ábra. A jobb oldali képen jól látható a CTA szonda is.



6. ábra. PIV és BOS nyers képek

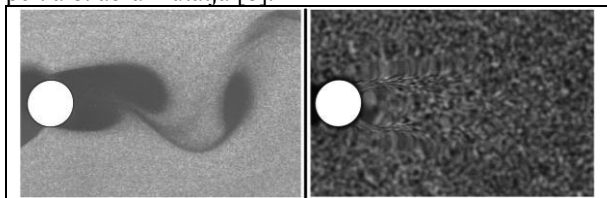
A 6. ábrán látható nyers képek a mérés után feldolgozásra, valamint az eredmények exportálásra (ASCII formátumba) kerülnek. Az exportált eredmények Matlab® programmal történő feldolgozás utáni eredménye a 7. ábrán látható. Ezen az ábrán a sebességmező vektorokkal, a hőmérsékletmező szürkeskálával van ábrázolva [6].



7. ábra. A meghatározott sebesség- és hőmérsékletmező

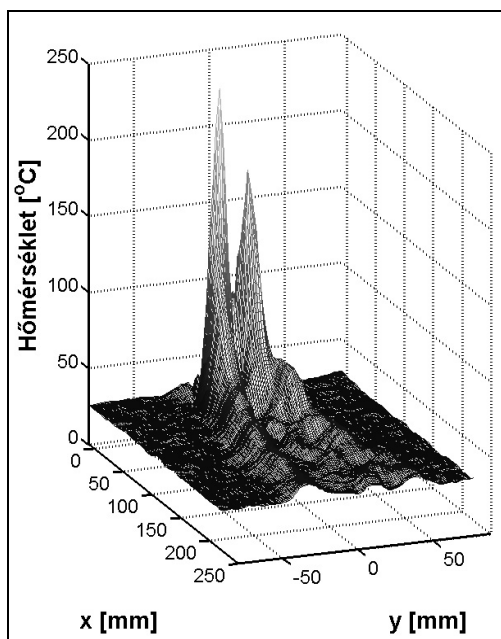
LED háttérmegvilágítás és TTL szinkronizáló elektronika használata

A későbbiekben a technikát finomítottuk és egy szabályozó TTL elektronika használatával a PIV és a BOS felvételek egymás után felváltva készültek igen kis időkülönbséggel. Interpoláció használatával számoltuk ki ezután az azonos időponthoz tartozó sebesség- és hőmérsékletértékeket. A PIV és BOS mérések során meghatározott sebességmező és hőmérsékletmező nyers képeit a 8. ábra mutatja [8].



8. ábra. PIV és BOS képek nyers képek

A 9. ábrán példaként egy meghatározott hőmérsékletmező látható. E képen a henger mögött közvetlenül két nagyhőmérsékletű csúcs látszik. Ezt követően erősen csökkenő mértékben, de egyértelműen látszik az örvénysorral azonos hőmérsékletcsúcs sorozat [8].



9. ábra. A hőmérsékletmező

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az utóbbi fél évtizedben német-magyar kutatási együttműködés felhasználásával intenzív kutatómunka folyt fűtött henger körül kialakuló sebesség- és hőmérséklettér mérésével való meghatározására. A sebességmező meghatározása már korábban a PIV technika segítségével jól sikerült. Jelen cikkben a hőmérsékletmező meghatározására tett kísérleteinket foglaltuk össze. Ennek során a Schlieren technika több változata került kipróbálásra. A fokozatos fejlesztő munka eredménye-

képpen elmondható, hogy jelenleg már megfelelő minőségű hőmérséklettérképek felvételét sikerült megoldanunk. Mindehhez társult az időben összetartozó sebesség- és hőmérsékletmező meghatározására szolgáló módszerek sikeres kipróbálása és fejlesztése.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki az OTKA (76085), NKTH-OTKA (68207) és a Magyar-Német együttműködési program P-MÖB/386-nak a kutatás támogatásért. A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

6. IRODALOM

- [1] Settles, G. S.: *Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, (2001).
- [2] Adrian, R.J.: *Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics*. Annual Reviews in Fluid Mechanics, 23(1), pp. 261-304, (1991).
- [3] Venkatakrisnan, L. and Meier, G.E.A.: *Density measurements using the Background Oriented Schlieren technique*. Experiments in Fluids, 37(2), pp. 237-247, (2004).
- [4] Bencs, P., Bordás, R., Zähringer, K., Szabó, Sz., and Thévenin, D.: *Towards the Application of a Schlieren Measurement Technique in a Wind-Tunnel*. Proceedings, MicroCAD International Computer Science Conference, Miskolc, Hungary, pp. 13-19, (2009).
- [5] Baranyi, L., Szabó, Sz., Bolló, B., and Bordás, R.: *Analysis of Flow Around a Heated Circular Cylinder*. Journal of Mechanical Science and Technology, 23, pp. 1829-1834, (2009).
- [6] Bencs, P., Szabó, Sz., Bordás, R., Thévenin, D., Zähringer, K. and Wunderlich, B.: *Investigation of the Velocity (PIV) and Temperature Field (BOS) of a Heated Cylinder in a Low Re-number Flow*. Proceedings, ISFV14 - 14th International Symposium on Flow Visualization, EXCO, Daegu, Korea, pp. 234/1-234/8, (2010).
- [7] Bencs, P., Szabó, Sz.: *Application of Z-type Schlieren technique for Flow Visualization around Heated Cylinder*. Proceedings, ISFV14 - 14th International Symposium on Flow Visualization, EXCO, Daegu, Korea pp. 240/1-240/7, (2010).
- [8] Bencs, P., Szabó, Sz., Bordás, R., Zähringer K., Thévenin, D.: *Synchronization of Particle Image Velocimetry and Background Oriented Schlieren Measurement Techniques*. Proc. The 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, Moscow, Russia (2011), on CD ROM, pp. 1-6, Paper No. 003 PSFVIP8.