

HÁTTÉR HATÁSA A BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN TECHNIKÁVAL MÉRT HŐMÉRSÉKLET MEZŐRE

INFLUENCE OF BACKGROUND PATTERN ON THE TEMPERATURE FIELD MEASURED BY BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN

Bencs Péter¹, dr. Szabó Szilárd², dr. Bordás Róbert³, dr. Dominique Thévenin⁴,
dr. Katharina Zähringer⁵

ABSTRACT

The objective of this work is to find the optimal dot density for the background pattern used in Background Oriented Schlieren (BOS) measurements. BOS is based on light deflection of a background pattern due to density gradients in the investigated flow field. The present contribution considers the effect of different background structures on the resulting temperature field. It is obvious that the background quality (dot pattern and density) have an influence on the results, when the temperature (density) gradients locally vary. The measurements are carried out in the wake of an electrically heated cylinder (with a diameter of 10 mm and with a maximum surface temperature of 300°C) mounted in a wind tunnel with a closed test section. The main innovation of the developed method is the associated visualization of the temperature field. BOS is now employed in order to obtain quantitative results. First synchronization tests have helped determining the proper background pattern and the delay process for BOS in the present configuration.

1. BEVEZETÉS

Áramlásba helyezett környezeti hőmérséklettől eltérő hőmérsékletű prizmatikus testekkel gyakran találkozhatunk a műszaki gyakorlatban is, mint például elektromos távvezetékek, fűtőpatronok, hőcserélők, gyárkémmények, stb. A prizmatikus test körüli áramlás struktúrája régóta kutatott terület [1-7]. A Kármán örvénysor kísérleti és numerikus szimulációs vizsgálatával sok tudós

foglalkozik. A már régebben ismert Schlieren mérési technika folyamatos fejlesztése napjainkban is folyik. Örök kérdés a fűtött prizmatikus testek hatása az örvényleválásra. Mi a hatása a fűtésnek az örvényleválás frekvenciájára, struktúrájára és az örvények helyzetére. Sok kérdés már megválaszolásra került numerikus szimulációk és Particle Image Velocimetry (PIV) [1-7] segítségével. További kérdés maradt az örvény struktúra és a kényszerkonvekció hatása a test hővesztésére. A kérdés megoldására a Background Oriented Schlieren (BOS) eljárást alkalmazzuk. A mérések során fontos biztosítani a hőmérséklet- és az örvénymező mérésének egyidejűségét. Munkánk a fő specialitása az egyidejű mérés megvalósítása egy kamerával, felhasználva az előző kísérleteink tapasztalatait [8,9].

Korábbi vizsgálataink alapján megállapítható volt, hogy a kellő minőségű BOS eredmények eléréséhez fontos a megfelelően megválasztott háttér. Jelen munka keretében ezért elemezzük a különböző hátterek hatását a BOS mérési eredményekre. A mérések pontos megismételhetősége végett a kísérleteket zárt Göttingen típusú szélcsatornában hajtottuk végre. Az eredményeinket a numerikus szimulációk validálására kívánjuk felhasználni.

2. A SCHLIEREN RENDSZER

2.1. A Schlieren rendszer felépítése

A mérési elrendezés az 1. ábrán látható, ahol a fűtött henger az áramlásra merőlegesen van rögzítve a szélcsatorna 500x600 mm keresztmetszetű mérőszakaszába. Az alapáramlás átlagsebességét $v=0,3$ m/s-ra állítottuk be, ami a szélcsatornában minimálisan előállítható stabil alapáramlás. A szélcsatornában így a Reynolds szám $Re=11.000$, ami a szélcsatorna mérőszakaszában mért átlagsebességéből, a szélcsatorna hidraulikus átmérőjéből és a környezeti hőmérsékletű viszkozitásból számítható. A szélcsatorna két oldalán átlátszó üvegfelület található amiknek a közepén furatok találhatók a fűtött henger rögzítésére (1. ábra). A henger átmérője $d=10$ mm és a henger szabályozható fűtését toroid transzformátorral

¹egyetemi tanársegéd, ²egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke

³egyetemi docens, ⁴egyetemi tanár, ⁵egyetemi docens, University of Magdeburg „Otto-von-Guericke”, Institute of Fluid Dynamics and Thermodynamics, Németország

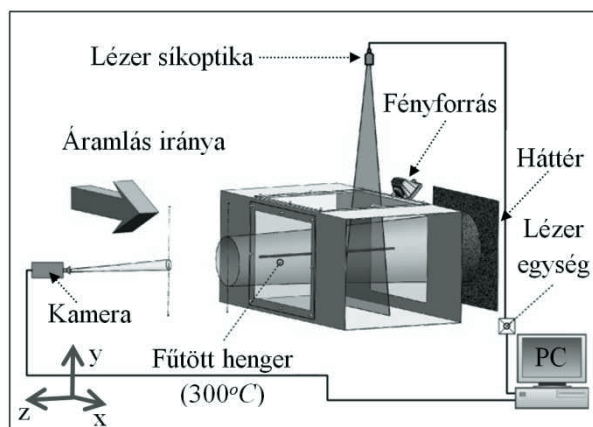
email: ¹arambp@uni-miskolc.hu, ²aram2xsz@uni-miskolc.hu,

³bordas@ovgu.de, ⁴thevenin@ovgu.de,

⁵Katharina.Zaehring@ovgu.de

valósítjuk meg. A henger átlaghőmérsékletét a hengerbe épített termoelemmel mérjük. A mérések során a henger átlaghőmérsékletét 300°C -ra választottuk, mert ekkor már a környezettől jelentős mértékben eltérő hőmérséklet miatt a vizsgált jelenség kellő intenzitással jelentkezik. A hengerre vonatkozó Reynolds szám $Re_{\text{henger}}=200$, ami az alapáramlás átlagsebességéből, a henger átmérőjéből és a környezeti hőmérsékletű viszkozitásból számítható. Ezen alacsony Reynolds szám tartományban alakul ugyanis ki a henger mögött kétdimenziós lamináris áramlás, amely szükséges ahhoz, hogy a fűtött rúddal párhuzamos optikai tengely mentén az áramkép ne változzon.

A sebességmező meghatározása PIV technikával történik, amihez a hengerre merőleges lézersíkot egy lézeregység állítja elő. A lézerekkel megvilágított felületen kialakuló áramlás mozgásjellemzőit a síkkal szemben elhelyezett kamera felvételeinek kiértékelésével nyerjük. A hőmérsékletmező meghatározásához a vizsgált térrész mögött elhelyezett úgynevezett háttérrel egy erős fényforrással világítjuk meg. A háttérrel elhelyezett mintázatot ugyanazon kamera figyeli. A hőmérsékletváltozás miatt a levegő törésmutatói megváltoznak. Ennek mértékével arányosan a mintázatot a kamera eltorzultan látja. A kapott képek szoftveres feldolgozásával a hőmérsékletmező előállítható.



1. ábra. A mérési elrendezés

2.2. BOS rendszer

2D síkbeli mérésre alkalmas PIV rendszert használtunk a sebesség- és hőmérsékletmező meghatározásához. A rendszer főbb elemeit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat PIV/BOS rendszer elemei

| Eszköz | Leírás |
|---|---|
| Dupla frame CCD kamera | FlowMaster3S ImagerIntense, 12 bit megjelenítés, felvételi frekvencia.: 10 Hz |
| Objektív | 105 mm AF Micro-Nikkor; f -szám: 11 és fókusz távolság ~ 3 m |
| PC frame grabber kártyával és szoftverrel | DaVis 7.2 képrögzítéshez és PIVlab a képfeldolgozáshoz és keresztkorreláció eljárásához |

A BOS méréseknél alkalmazott szoftver a képrögzítéshez és feldolgozáshoz használatos kereskedelmi PIV szoftver volt (DaVis szoftver verzió 7.2 a LaVision-tól). A PIV kamera kalibrálását egy kalibrációs táblával végeztük, aminek segítségével a szoftveren belül beállítható a pix/mm arány. A kalibrációs tábla segítségével lehetőség nyílik a kamera és a mérési sík közötti torzítások beállítására is a szoftveren belül. A kamera objektíve a kalibrációs táblára volt fókuszálva és a rekeszmérete az az f -szám: 11 volt.

2.3. BOS Háttér változatok

A BOS kép minősége nagyon fontos a megfelelő minőségű hőmérsékletmező meghatározásához, ezért megvizsgáltuk, hogy különböző mintázatu hátterek, különböző erősségű megvilágítás és kétféle expozíciós idő esetén, hogyan változik a BOS eredmények minősége. A vizsgált háttértípusokat a 2. táblázatban rögzítettük.

2. táblázat. Vizsgált háttér mintázatok

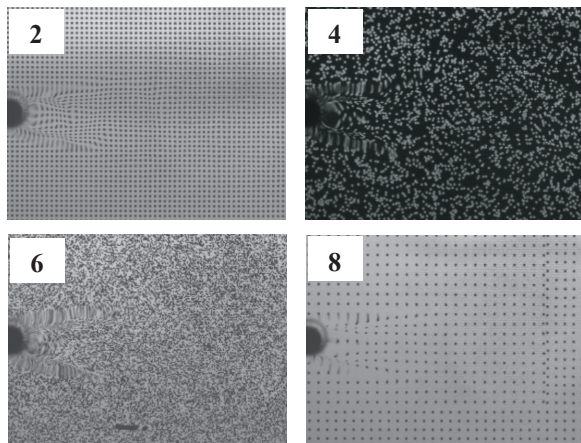
| Sorszám | Leírás | Sorszám | Leírás |
|---------|---|---------|--|
| 1. | Négyzet mintázat ¹ | 15. | Háromszög mintázat ¹ |
| 2. | Négyzet mintázat ² | 16. | Háromszög mintázat ² |
| 3. | Véletlen pont mintázat (50000 1mm) ¹ | 17. | Háromszög mintázat dupla méret, 2 lámpa ¹ |
| 4. | Véletlen pont mintázat (50000 1mm) ² | 18. | Háromszög mintázat dupla méret ¹ |
| 5. | Véletlen pont mintázat ¹ | 19. | Háromszög mintázat dupla méret, 2 lámpa ² |
| 6. | Véletlen pont mintázat ² | 20. | Háromszög mintázat dupla méret ² |
| 7. | Változó sűrűségű négyzetes mintázat ¹ | 21. | Háromszög mintázat 2 dupla méret, 2 lámpa ¹ |
| 8. | Változó sűrűségű négyzetes mintázat ² | 22. | Háromszög mintázat 2 dupla méret ¹ |
| 9. | Véletlen pont mintázat (50000 0,8mm) ¹ | 23. | Háromszög mintázat 2 dupla méret, 2 lámpa ² |
| 10. | Véletlen pont mintázat (50000 0,8mm) ² | 24. | Háromszög mintázat 2 dupla méret ² |
| 11. | Dupla háromszög mintázat ¹ | 25. | Változó mintázatu háttér 2, 2 lámpa ¹ |
| 12. | Dupla háromszög mintázat ² | 26. | Változó mintázatu háttér 2 ¹ |
| 13. | Változó mintázatu háttér ¹ | 27. | Változó mintázatu háttér 2, 2 lámpa ² |
| 14. | Változó mintázatu háttér ² | 28. | Változó mintázatu háttér 2 ² |

¹Expozíciós idő = 64 ms

²Expozíciós idő = 102 ms

A 2. ábra képei különféle mintázatu háttereket mutatnak mérés közben. A képeken az áramlás balról jobbra történik. Mindegyik háttértípus kialakítása során saját fejlesztésű Matlab® kódot használtunk. A háttértípusok kialakításánál figyelembe vettük előző kísérleteinkből eredő tapasztalatainkat [8,9]. A vizsgálatok során a háttér és a mérési sík közötti távolság 0,28 m volt. A háttér egyenletes megvilágítását halogén lámpák biztosították. A mérések során a PIV mérésekkel azonos beállításokat

alkalmaztunk (kamera beállításai és az objektív f -száma).

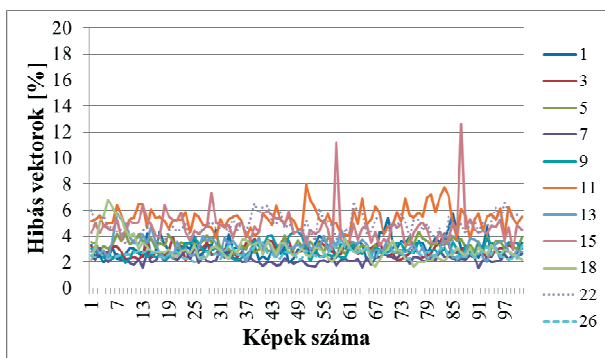


2. ábra. Különböző mintázatú hátterek (mérés közben)

3. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

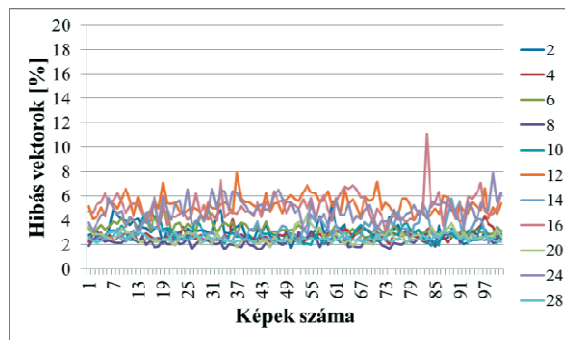
3.1. A keresztkorreláció hibaszázaléka

A BOS mérési eredmények kiértékelésekor a keresztkorreláció elvégzésére a PIVlab szoftvert, a további adatfeldolgozáshoz pedig saját fejlesztésű Matlab® programot használtunk. A keresztkorreláció során az iterációs terület 32×32 pixel és az átlapolás 50% volt. Minden egyes mérési változat során 101 képet rögzítettünk. A keresztkorreláció végeredménye egy elmozdulás mátrix. A háttérmintázatok értékelésére különféle eljárásokat alkalmaztunk, először a keresztkorreláció során viszonyítottuk a hibás vektorok számát a teljes vektormezőhöz. A hibás vektorok a validációs tartományon kívül helyezkednek el. Előző mérési eredményeinkből [8,9] jól megállapítható volt a megfelelő validációs tartomány.



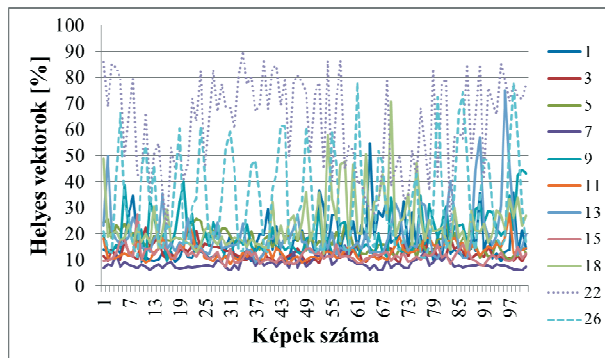
3. ábra. Hibavektorok 64 ms expozíciós idő esetén

A 3. és a 4. ábrán látható a hibavektorok megoszlása a különböző háttérváltozatok esetén, illetve a két külön expozíciós idő esetén. Az eredményekből jól látszik, hogy a hibavektorok a keresztkorreláció után és a validálás előtt 10% alatt maradnak. A hibaszázalékok alapján megtörtént a háttérváltozatok összehasonlítása és rangsorolása.



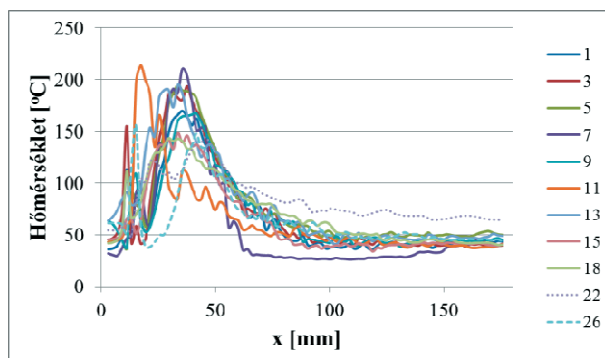
4. ábra. Hibavektorok 102 ms expozíciós idő esetén

3.2. Háttérmintázat hatékonysága



5. ábra. Hatékonyság 64 ms expozíciós idő esetén

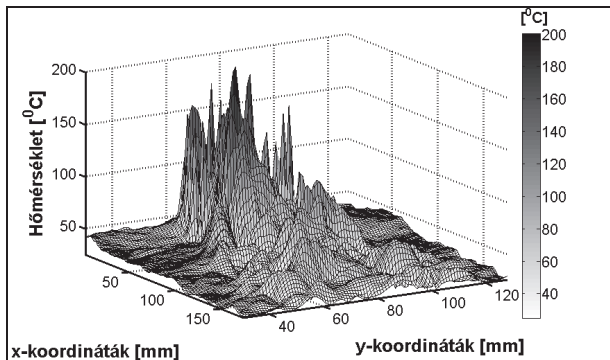
A háttérmintázat hatékonyságát úgy számítjuk ki, hogy a keresztkorrelációs eredményekből kiszámítjuk a hőmérsékletmezőt és a környezeti hőmérséklettel eltérő hőmérséklet értékek mennyiségét viszonyítjuk a környezeti hőmérséklethez képest. Ezen arányok változása látható az 5. ábrán. Az eredményekből megállapítható, hogy a 22 és 26-os számú változat esetén maximális a hatékonysága a választott háttérnek. A 102 ms esetén is hasonló eredményeket kapunk, mint a 5. ábrán láthatóak.



6. ábra. Átlaghőmérséklet megoszlása az áramlás irányában a hengertől távolodva (64 ms expozíciós idő)

A 6. ábrán a fűtött henger vízszintes közepsíkjában (az áramlás irányába távolodva a hengertől) az átlaghőmérséklet változása látható a 64 ms expozíciós idő esetén. A 6. ábrán látható görbék az adott mérési változat során rögzített 101 kép átlagából vannak ábrázolva. A 102 ms expozíciós idő esetén teljesen hasonlóak az eredmények, mint a 6. ábrán láthatóak. Az eddig kiérté-

kelés során azt tapasztaltuk, hogy a 22 és 26-os számú változat a legjobb, de a 6. ábra adatai alapján megállapítható a 26-os számú változat esetén a legegyszerűsebb a hőmérséklet eloszlás a középvonal mentén. Az értékelési kritériumokat együttesen vizsgálva tehát a 26-os jelű háttér felel meg a legjobban. A 7. ábrán a hőmérséklet eloszlás látható a fűtött henger mögött a 26-os számú háttér típus alkalmazása esetén.



7. ábra. Atlaghőmérséklet megoszlása a henger mögött (26-os számú háttér mintázat esetén)

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A hőmérsékletmező minőségi meghatározásában fontos szerepet játszanak a megfelelő minőségű BOS eredmények. A bemutatott vizsgálatok jól mutatják, hogy a megfelelően kiválasztott háttér struktúra alkalmazásával sikerült a BOS eljárás minőségét javítanunk. Az eredmények alapján lehetőség nyílik nem csak a sebességmező (PIV), hanem a fűtött henger mögött kialakuló hőmérsékletmező megfelelő minőségű detektálására. Az általunk kifejlesztett Matlab® program sikeresen alkalmazható volt a mérési eredmények feldolgozásánál. A megfelelő minőségű BOS eredményeket a 26-os azonosítási számú háttérrel sikerült elérnünk. A továbblépéshez a kapott hőmérsékletértékek validációjára van szükség a hibák csökkentésére és a pontosság növelése érdekében. Ez más nagy pontosságú módszerekkel (pl. CTA) meghatározott hőmérsékletértékekkel való összehasonlítás segítségével történhet. A végeredményül adódó pontos hőmérsékletmező és a PIV eljárással megkapott örvénymező egybevetésével a kutatás következő fázisában megállapítható lesz a kényszerkonvekció és az örvényleválások közötti kapcsolat.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki az OTKA (76085), NKTH-OTKA (68207) és a P-MÖB/386 sz. Magyar-Német kutatócsere programnak a kutatás támogatásáért. A 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] WILLIAMSON, C.H.K.: Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1996. 28(1): pp. 477-539.
- [2] WANG, A.B. AND TRÁVNIČEK, Z.: On the linear heat transfer correlation of a heated circular cylinder in laminar crossflow using a new representative temperature concept. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001. 44(24): pp. 4635-4647.
- [3] BARANYI, L., SZABÓ, SZ., BOLLÓ, B., AND BORDÁS, R.: Analysis of flow around a heated circular cylinder. *Proc. 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*. 2008. Sapporo, Japan (No. 08-201.), A 115. pp. 1-4.
- [4] BENCS, P., BORDÁS, R., ZÄHRINGER, K., SZABÓ, SZ., AND THÉVENIN, D.: Towards the application of a Schlieren measurement technique in a wind-tunnel. *Proc. MicroCAD'09 International Computer Science Conference*. 2009. Miskolc, Hungary. 978-963-661-866-7 pp. 13-19.
- [5] BOLLÓ, B., BARANYI, L., BORDÁS, R., TOLVAJ, B., BENCS, P., DARÓCZY, L., AND SZABÓ, SZ.: Numerical and experimental investigation of momentum and heat transfer from a heated circular cylinder. *Proc. MicroCAD'08 International Scientific Conference*. 2008. Miskolc, Hungary. 978-963-661-816-2 pp. 1-8.
- [6] BARANYI, L., SZABÓ, S., BOLLÓ, B., AND BORDÁS, R.: Analysis of flow around a heated circular cylinder. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2009. 23: pp. 1829-1834.
- [7] ADRIAN, R.J.: Particle-Imaging techniques for experimental Fluid Mechanics. *Annual Reviews in Fluid Mechanics*, 1991. 23(1): pp. 261-304.
- [8] BENCS, P., SZABÓ, SZ., BORDÁS, R., ZÄHRINGER, K., AND THÉVENIN, D.: Simultaneous measurement of velocity and temperature downstream of a heated cylinder. *Proc. ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Conference, Symposium on Operations and Maintenance of Pressure Vessels, Heat Exchangers, and Structures*. 2011. Baltimore, USA, pp. 1-6, Paper No. PVP2011-57789.
- [9] BENCS, P., SZABÓ, SZ., BORDÁS, R., ZÄHRINGER, K., AND THÉVENIN, D.: Synchronization of Particle Image Velocimetry and Background Oriented Schlieren Measurement Techniques. *Proc. 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, 2011. Moscow, Russia, pp. 1-6, Paper No. 003 PSFVIP8.