Direct Numerical Simulation of transitional and turbulent flows in a square duct

HAMID HASSAN KHAN

DEPARTMENT OF APPLIED MECHANICS

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

DECEMBER 2020

Direct Numerical Simulation of transitional and turbulent flows in a square duct

by

HAMID HASSAN KHAN
Department of Applied Mechanics

Submitted
in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy
to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

DECEMBER 2020

Certificate

This is to certify that the thesis entitled **"Direct Numerical Simulation of transitional and turbulent flows in a square duct"**, being submitted by **Hamid Hassan Khan** to the Indian Institute of Technology Delhi for the award of the degree of **Doctor of Philosophy**, is a record of the bonafide research carried out by him which has been prepared under our supervisions in conformity with the rules and regulations of the Indian Institute of Technology Delhi. The research reports and results presented in the thesis has not been submitted for any degree or diploma in any other university or institute.

Prof. Sanjeev Sanghi
Professor
Department of Applied Mechanics
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi - 110016
India

Prof. Syed Fahad Anwer
Professor
Mechanical Engineering Department
ZHCET, Aligarh Muslim University
Aligarh - 202002
India

Acknowledgements

This PhD journey acquired explicit and implicit knowledge in different ways is full of perception, reason, memory, testimony, scientific inquiry, education, and practice. It is my pleasure to acknowledge everyone who was instrumental in this journey.

First of all, with profoundness and heartfelt reverence, my sincere gratitude to my supervisors Prof. Sanjeev Sanghi and Prof. Syed Fahad Anwer, for their patience, support, and encouragement throughout the tenure of this work. My special thanks to Prof. Sanjeev Sanghi for all his teaching and guidance. His in-depth knowledge, generous behaviour, and moral support are the reasons behind this work's success. I would like to thank my co-supervisor, Prof. Syed Fahad Anwer, for his guidance, invaluable suggestions and warm encouragement. I wish to thank Prof. Nadeem Hasan for his critical comments, technical input and his readiness to help whenever required.

My gratitude towards my research committe members Prof. S.V. Veeravalli, Prof. Anupam Dewan and Dr. Amit Gupta for reviewing my research work. I sincerely thank them for their insightful feedback and valuable suggestions in the development of the thesis.

I sincerely thank Prof. Atul Sharma (IIT Bombay) for nurturing my research ambition. I am grateful for the opportunity Prof. Atul Sharma and Prof. Atul Srivastava gave me after my Mtech to work as a research fellow in IIT Bombay. I thank my Btech advisor Dr. Moloy Kumar Banerjee (West Bengal University of Technology), and Mtech advisor Dr. Nilkanta Barman (Jadavpur University), to introduce and teach me computational fluid dynamics. It is my pleasure to acknowledge my elder brother Dr. Majid, another fluid dynamics researcher in my family. I am grateful for his moral support during distress and his happiness from my achievements.

I thank my lab seniors Dr. Pritanshu, Dr. Sisodia, Dr. Rawat, and Dr. Lakvinder, for their motivational presence. I admire Dr. Lokesh for all the technical discussion and help he provided during my PhD. The PhD journey was enjoyable due to friends like Dr. Anuj, Dr. B. Babu, Dr. F. Ishteyaque, Dr. Lokesh and Mr. Rishav. My gratitude and humblest admiration to all my lab-mates - Mr. Sartaj, Mr. Deepak, Mr. Khawar, Mr. Haroon, Dr. Sagar, Mr. Sandeep, Mr. Ashutosh, Mr. Nitin for a memorable, enthusiastic, and energetic lab atmosphere.

I wholeheartedly express my thanks to my mother and father for acting as a pillar of strength. Their belief in me, encouragement, support, sacrifice, and patience are the key to my success. I thank my sisters Appi and Neha, for their affection and emotional support. My gratitude to my sister-in-law, Sahreen, and brothers-in-law, Mr. Pervez Khan and Mr. Kamran Khan, for their warm wishes. My love and affection to little nephews, Amaan and Daniyal, and nieces, Afsheen and Zainab.

Finally, my praise be to ALLAH for showering his blessings and taking care of everything.

HAMID HASSAN KHAN

Abstract

Applications of duct flow are ubiquitous in oil and gas pipelines, heat exchangers, turbomachinery and nuclear engineering. The understanding of transition and turbulent flow in ducts is hailed as an important problem in industrial applications and scientific research. A non-circular duct with square cross-sectional geometry often shares interesting flow phenomena as compared to the pipe and channel flow. The in-depth perspective of the underlying dynamics of transition and turbulent flow in a square duct is still evolving and yet to be fully understood.

The overall aim of the thesis is to develop an optimized DNS solver and study the underlying dynamics of transitional and turbulent flow coherent motion in an infinite and finite length square duct. The DNS solver is optimized on an MPI parallel platform using a cubic (or 3D) domain decomposition technique, array operation, user-interface and parallel input/output. The parallel performance analysis of the optimized DNS solver on the multiprocessor computing system (PADUM supercomputer) shows 80% efficiency.

The DNS solver numerically investigates the transition and turbulent flow in an infinite length (or periodic boundary condition in streamwise direction) square duct. The thesis demonstrate the organized motion of the flow regimes below the frictional Reynolds number of the fully turbulent flow. The transitional flow is coined as "minimal and marginal" flows. The vortex-detection technique unveil hairpin vortices in fully and minimal turbulent flow in the square duct. Bursting of streaks is detected with variable interval time average, and the evolution of hairpin vortices has also been addressed. Turbulent intensities and energy spectra are reported and compared between the minimal,

marginal and fully turbulent flow. The minimal turbulence in a square duct indicates transitional turbulent flow characteristics like lesser occurrence of ejection and sweep, intermittent bursting events, and steeper variation of energy spectrum as compared to fully turbulent energy spectrum distribution.

The coherent structures are identified through the spatial and temporal analysis of Proper Orthogonal Decomposition (POD) modes. Analysis of two sets of POD data is performed. In obtaining the first set, POD is performed on the combined fluctuating velocity vector, while for the second set, only the fluctuating velocity along the y- or z-direction is used. It was found that the first two most energetic spatial POD modes are the streamwise-independent or non-propagating roll modes. The third and fourth most energetic modes are observed to be streamwise-dependent, propagating modes. The spatio-temporal analysis of POD modes confirms the presence of traveling waves in the square duct, and its average speed is also calculated. The POD of the second dataset showed only propagating modes, and no non-propagating modes were found. These propagating modes are also rotationally symmetric. It has been shown that there is an energy exchange between non-propagating modes and propagating modes. The flow dynamics of the first four reconstructed POD modes portray the self-sustaining turbulence mechanism in a square duct. The structures obtained from the first POD dataset reconstruction of 10% energy show well-organized hairpin vortices. Furthermore, the dataset reconstructed from modes containing 35% energy, gives detailed information on the coherent structures aligned along the wavy streamwise direction.

Laminar to turbulent flow transition in a finite length square duct has been carried out for the first time by imposing novel spatio-temporal finite amplitude inlet disturbance on the laminar flow. A short-duration narrow ring inlet disturbance is used, and it elucidates the most exciting dynamics of laminar to turbulence transition in a square duct. A short-duration inlet disturbance is imposed on the laminar flow at upper and lower transitional range bulk Reynolds number 2260 and 1540, respectively. The laminar flow at upper and lower transitional range Reynolds number is similar to marginal and minimal turbulent

flow in a square duct. A disturbance applied on the upper transitional range laminar flow propagates downstream, giving puff (transition) and slug (turbulent) flow phenomena similar to pipe flow. However, at the lower transitional range, inlet disturbance shows only a puff-like structure. The mean secondary flow is obtained by the time and space average of the puff and slug region. The four vortex secondary flow is observed in a puff region with two vortex on each vertical/horizontal wall, while conventional eight vortex is observed in the slug region. The transition (puff) flow coherent structures show the presence of dual-type hairpin structures. The dual-type coherent structures consist of conventional forward and non-convention reverse hairpin vortices. The high-speed streaks from the inlet disturbance play a role in the formation of the reverse hairpin. The turbulent kinetic energy indicates that the conventional -5/3 spectra for slug (turbulent) flow and -2 energy spectra for puff (transition) flow because of the flow's intermittency at the transition. We now confirm that the novel inlet disturbance through narrow ring captures laminar to turbulent transition.

सार

डक्ट फ्लो के अनुप्रयोग तेल और गैस पाइपलाइनों, हीट एक्सचेंजर्स, टर्बो-मशीनरी और परमाणु इंजीनियरिंग में सर्वव्यापी हैं। नलिकाओं में संक्रमण और अशांत प्रवाह की समझ औद्योगिक अनुप्रयोगों और वैज्ञानिक अनुसंधान में एक महत्वपूर्ण समस्या के रूप में है। वर्ग क्रॉस-अनुभागीय ज्यामिति के साथ एक गैर-परिपत्र डक्ट अक्सर पाइप और चैनल प्रवाह की तुलना में दिलचस्प प्रवाह की घटनाओं को साझा करता है। एक वर्ग वाहिनी में संक्रमण और अशांत प्रवाह की अंतर्निहित गतिशीलता का गहन परिप्रेक्ष्य अभी भी विकसित हो रहा है और अभी तक पूरी तरह से समझा नहीं जा सका है।

थीसिस का समग्र उद्देश्य एक अनुकूलित डीएनएस सॉल्वर विकसित करना और एक अनंत और सीमित लंबाई वर्ग वाहिनी में संक्रमणकालीन और अशांत प्रवाह सुसंगत गति के अंतर्निहित गतिशीलता का अध्ययन करना है। DNS सॉल्वर को MPI समानांतर प्लेटफ़ॉर्म पर क्यूबिक (या 3D) डोमेन अपघटन तकनीक, सरणी ऑपरेशन, उपयोगकर्ता और इंटरफ़ेस का उपयोग करके अनुकूलित किया गया है और समानांतर इनपुट / आउटपुट। मल्टीप्रोसेसर कंप्यूटिंग सिस्टम (PADUM सुपर कंप्यूटर) पर अनुकूलित DNS सॉल्वर का समानांतर प्रदर्शन विश्लेषण 80% दक्षता दर्शाता है।

DNS सॉल्वर संख्यात्मक रूप से संक्रमण और अशांत प्रवाह की एक अनंत लंबाई (या स्ट्रीमवाइज दिशा में आवधिक सीमा स्थिति) वर्ग वाहिनी की जांच करता है। थीसिस पूरी तरह से अशांत प्रवाह के घर्षण रेनॉल्ड्स संख्या के नीचे प्रवाह शासनों के संगठित गति को प्रदर्शित करता है। संक्रमणकालीन प्रवाह को "न्यूनतम और सीमांत" प्रवाह के रूप में गढ़ा गया है। भंवर का पता लगाने की तकनीक स्क्वायर डक्ट में पूरी तरह से और न्यूनतम अशांत प्रवाह में हेयरपिन भंवर का अनावरण करती है। स्ट्रीक के फटने का पता वैरिएबल इंटरवल टाइम एवरेज से लगाया जाता है, और हेयरपिन भंवरों के विकास को भी संबोधित किया गया है। टर्बुलेंट तीव्रता और ऊर्जा स्पेक्ट्रा की रिपोर्ट की जाती है और न्यूनतम, सीमांत और पूरी तरह से अशांत प्रवाह के बीच तुलना की जाती है। एक वर्ग वाहिनी में न्यूनतम अशांति संकेत के रूप में संक्रमण और प्रवाह की कम घटना, आंतरायिक फटने की घटनाओं, और ऊर्जा स्पेक्ट्रम की तुलना में भिन्नता जैसी संक्रमणकालीन अशांत प्रवाह विशेषताओं को इंगित करता है पूरी तरह से अशांत ऊर्जा स्पेक्ट्रम वितरण।

सुसंगत ऑर्थोगोनल अपघटन (POD) मोड के स्थानिक और लौकिक विश्लेषण के माध्यम से सुसंगत संरचनाओं की पहचान की जाती है। POD डेटा के दो सेटों का विश्लेषण किया जाता है। पहला सेट प्राप्त करने में, POD को संयुक्त उतार-चढ़ाव वाले वेग सदिश पर किया जाता है, जबकि दूसरे सेट के लिए केवल y- या के साथ उतार-चढ़ाव वाला वेग होता है। z- दिशा का उपयोग किया जाता है। यह पाया गया कि पहले दो सबसे ऊर्जावान स्थानिक POD मोड स्ट्रीम-इंडिपेंडेंट या नॉन-प्रॉपगेटिंग रोल मोड हैं। तीसरे और चौथे सबसे ऊर्जावान मोड को स्ट्रीम-निर्भर, प्रचार मोड के रूप में देखा जाता है। पीओडी मोड के स्थानिक-लौकिक विश्लेषण, स्क्वायर डक्ट में यात्रा तरंगों की उपस्थिति की पुष्टि करता है, और इसकी औसत गति भी गणना की जाती है। दूसरे डेटासेट के POD ने केवल प्रचार मोड दिखाए, और कोई भी गैर-प्रचार मोड नहीं मिला। ये प्रचार मोड भी घूर्णी रूप से सममित हैं। यह दिखाया गया है कि गैर- प्रचार मोड और प्रचार मोड के बीच एक ऊर्जा विनिमय है। पहले चार खंगाले POD मोड के प्रवाह की गतिशीलता आत्मनिर्भर अशांति तंत्र को दर्शाती है एक वर्ग वाहिनी में। 10% ऊर्जा के पहले POD डेटासेट पुनर्निर्माण से प्राप्त संरचनाएं सुव्यवस्थित हेयरपिन भंवर दिखाती हैं। इसके अलावा, डेटासेट 35% ऊर्जा वाले मोड से पुन: निर्मित होता है, सुसंगत संरचनाओं पर विस्तृत जानकारी देता है जो लहराती सुव्यवस्थित दिशा के साथ संरेखित है ।

पहली बार एक परिमित लंबाई के वर्ग वाहिनी में 'लामिना से अशांत प्रवाह संक्रमण' का अध्ययन किया गया है, लामिना के प्रवाह पर नए spatio- टेम्पोरल परिमित आयाम इनलेट अशांति का उपयोग करके । एक छोटी अवधि की संकीर्ण रिंग इनलेट disturbance का उपयोग किया जाता है, और यह एक वर्ग डक्ट में अशांति के संक्रमण के लिए लामिना के सबसे रोमांचक गतिशीलता को स्पष्ट करता है । एक छोटी अवधि की इनलेट disturbance को क्रमशः ऊपरी और निचले संक्रमणकालीन रेंज बल्क रेनॉल्ड्स नंबर 2260 और 1540 पर लामिना के प्रवाह पर लगाया जाता है। ऊपरी और निचले संक्रमणकालीन रेंज में लामिना का प्रवाह रेनॉल्ड्स संख्या एक वर्ग वाहिनी में सीमांत और न्यूनतम अशांत प्रवाह के समान है। ऊपरी संक्रमणकालीन रेंज पर एक अशांति लागू होती है लामिना का प्रवाह नीचे की ओर फैलता है, जिससे पफ (संक्रमण) और स्लग (अशांत) प्रवाह की घटनाएँ पाइप के प्रवाह के समान होती हैं। हालांकि, कम संक्रमणकालीन सीमा पर, इनलेट की गड़बड़ी केवल एक पफ-जैसी संरचना को दर्शाती है। औसत माध्यमिक प्रवाह पफ और स्लग क्षेत्र के समय और स्थान के औसत से प्राप्त होता है। चार भंवर माध्यमिक प्रवाह है प्रत्येक ऊर्ध्वाधर दीवार पर दो भंवर के साथ एक पफ क्षेत्र में पाया जाता है, जबकि पारंपरिक आठ भंवर स्लग क्षेत्र में पाया जाता है। संक्रमण (पफ) प्रवाह सुसंगत संरचनाएं दोहरे प्रकार के हेयरपिन संरचनाओं की उपस्थिति दर्शाती हैं। दोहरे प्रकार के सुसंगत संरचनाओं में पारंपरिक आगे और गैर-सम्मेलन रिवर्स हेयरपिन भंवर शामिल हैं। उच्च गति इनलेट disturbance से लकीरें रिवर्स हेयरपिन के गठन में एक भूमिका निभाती हैं। अशांत गतिज ऊर्जा इंगित करती है कि स्लग (अशांत) प्रवाह के लिए पारंपरिक -5/3 स्पेक्ट्रा और पफ (संक्रमण) प्रवाह के लिए -2 ऊर्जा स्पेक्ट्रा -- संक्रमण पर प्रवाह की रुकावट के कारण पाया जाता है। अब हम पुष्टि करते हैं कि संकीर्ण रिंग के माध्यम से नए इनलेट की disturbance से लामिना - अशांत संक्रमण को पकड़ लेती है।

Table of Contents

List of Figures

List of Tables

Nomenclature

Notations

Δt	time step
Δx^+, Δy^+, Δz^+	wall units grid resolution in x, y, z direction
$\mid \omega_y^+ \mid_{max}$	strength of low speed streak
$\mathbf{U}^{'}$	corrected velocity
$\mathbf{U}^{*}$	predicted velocity vector
$\mathbf{U}^{n+1}$	new time level velocity vector
$\mathbf{U}^{n}$	previous time level velocity vector
a	POD or temporal coefficient
A_d	amplitude of disturbance
f	frequency
$P^{'}$	corrected pressure
P^{n+1}	new time level pressure field
P^{n}	previous time level pressure field
$u^{'}$, $v^{'}$, $w^{'}$	fluctuating velocities in x, y, z direction
u_0	base flow velocity
2D	two dimension
3D	three dimension
$\mathbf{F}$	source term
$\mathbf{U}$	velocity vector
E(k)	energy spectra

E(t)	Mode energy
h	square duct width
i, j, k	local grid indices
k	wave number
L	streamwise length of square duct
L_x, L_y, L_z	square duct length in x, y, z direction
N_x, N_y and N_z	numbers of grid points in x, y and z-direction
P	pressure
Pe	Peclet number
Q	column vector containing source terms
Re	Reynolds number
Re_τ	frictional Reynolds number
Re_b	bulk Reynolds number
S(t)	Mode entropy
t	time scale
U	mean speed of flow
u_τ	frictional velocity
u, v, w	velocity in x, y, z directions
x, y, z	direction in cartesian coordinate

Greek Symbols

α	eigenvector
η	Kolmogorov length scale
λ	eigenvalue
λ_r	real eigenvalue
λ_{ci}	swirling strength
ν	kinematic viscosity
ϕ	eigenfunction
ϕ_u, ϕ_v, ϕ_w	eigenfunction in x, y, z direction

ρ	density
τ_w	wall shear stress

Other Symbols

∇	gradient operator
∇^2	laplace operator
∂	partial derivative
∂^2	partial double derivative

Abbreviation

API	application programming interface
BC	boundary condition
CFL	CourantFriedrichsLewy condition
CPU	central processing unit
DNS	Direct Numerical Simulation
Exp	experiment
FDM	finite difference method
GMRES	Generalized Minimal Residual
HDF5	Hierarchical Data Format
IITD	Indian Institute of Technology Delhi
LDV	Laser Doppler Velocimetry
MPI	Message-Passing-Interface
PCPE	pressure correction poisson equation
PISO	Pressure-Implicit with Splitting of Operators
POD	proper orthogonal decomposition
PSB	periodic suction and blowing
RAM	Random-access memory
RSB	random suction and blowing
SIMPLE	semi implicit method for pressure linked equations
SIMPLEC	semi-implicit method for pressure linked equations-consistent

SMAC	simplified marker and cell
VITA	variable interval time average