

บทความวิชาการ (Academic Article)

การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบควิตซ์รอบไฮโดรฟอยล์ ยอดชาย เตยเป็น¹ และไทยทัศน์ สุดสวนสี^{2,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมทางทะเล คณะพาณิชยศาสตร์บริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
² สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: thaithat.su@ksu.ac.th

(รับบทความ: 25 พฤษภาคม 2566; แก้ไขบทความ: 22 มิถุนายน 2566; ตอรับบทความ: 26 มิถุนายน 2566)

บทคัดย่อ

ควิตซ์เป็นปรากฏการณ์ของการก่อตัวและการยุบตัวของฟองอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการไหลในไฮโดรฟอยล์ซึ่งถูกนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ที่หลากหลาย เทคนิคการจำลองเชิงตัวเลขได้กลายเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจสอบและทำความเข้าใจการไหลของควิตซ์รอบไฮโดรฟอยล์ วัตถุประสงค์ของบทความนี้เพื่อนำเสนอเทคนิคล่าสุดในการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบควิตซ์รอบไฮโดรฟอยล์ โดยเน้นวิธีการที่สำคัญรวมถึงความท้าทายและโอกาสในอนาคตของเรื่องนี้ บทสรุปที่ได้จากบทความนี้ผู้วิจัยสามารถแนะนำแนวทางและเทคนิคของการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบควิตซ์รอบไฮโดรฟอยล์ไปประยุกต์ใช้และพัฒนาต่อยอดไปสู่การจำลองที่ซับซ้อนขึ้นเช่น การจำลองกังหันน้ำ เป็นต้น

คำสำคัญ: ควิตซ์ ไฮโดรฟอยล์ การจำลองเชิงตัวเลข คุณลักษณะของการไหล

การอ้างอิงบทความ: ยอดชาย เตยเป็น และ ไทยทัศน์ สุดสวนสี, "การจำลองเชิงตัวเลขของการไหลแบบควิตซ์รอบไฮโดรฟอยล์," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, vol. 1, no. 3, pp. 1-16, 2566.

บทความวิชาการ (Academic Article)

Numerical Simulation of Cavitating Flow around Hydrofoils

Yodchai Tiaple¹ and Thaithat Sudsuansee^{2,*}

¹ Department of Maritime Engineering, Faculty of International Maritime Studies, Kasetsart University, Sriracha Campus,

² Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding Author: thaithat.su@ksu.ac.th

(Received: May 25, 2023; Revised: June 22, 2023; Accepted: June 26, 2023)

Abstract

Cavitation is a bubble formation and collapse phenomenon that affects flow efficiency in hydrofoils, which are used in a variety of applications. Numerical simulation techniques have proven to be an efficient means of monitoring and comprehending cavitation flows around hydrofoils. This article's goal is to present the most recent techniques in numerical simulation of cavitation flow around a hydrofoil. It highlights key approaches as well as the subject's future challenges and opportunities. Researchers can apply the approaches and techniques of numerical simulation of cavitation flow around hydrofoils obtained from this article and further develop them into more complex simulations such as water turbine simulation.

Keywords: Cavitation, Hydrofoil, Numerical Simulation, Flow Characteristics

Please cite this article as: Y. Tiaple and T. Sudsuansee, "Numerical Simulation of Cavitating Flow around Hydrofoils," *Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 1, no. 3, pp. 1-16, 2023.

บทความวิชาการ (Academic Article)

1. บทนำ

ไฮโดรพอยล์เป็นส่วนประกอบสำคัญในวิศวกรรมทางทะเลและการบินและอวกาศ มีส่วนทำให้ยานพาหนะสามารถขับเคลื่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความเร็วสูง อย่างไรก็ตามการเกิดคาวิตีชันเป็นหนึ่งในปัญหาหลักที่สามารถนำไปสู่ผลกระทบที่เป็นอันตรายรวมถึงการเสื่อมสภาพของวัสดุ การเกิดเสียงและการสั่นสะเทือน การกัดเซาะ และความเสียหายต่อพื้นผิวไฮโดรพอยล์ การจำลองการไหลเพื่อทำนายผลการเกิดคาวิตีชันเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์เครื่องจักรกังหันในอุตสาหกรรมวิธีการที่นิยมใช้คือ การนำเทคนิคการจำลองเชิงตัวเลขมาใช้สำหรับทำนายผลที่เกิดขึ้นและวิเคราะห์ลักษณะการไหลที่ซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบคาวิตีชันในไฮโดรพอยล์

คาวิตีชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกรณีของเหลวไหลอุปกรณ์ของไหล เช่น เทอร์ไบน์หรือปั๊มน้ำ แล้วของเหลวมีความดันลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงระดับที่ทำให้ของเหลวนั้นแปรรูปเป็นก๊าซหรือไอ (สภาพแก๊ส) และเมื่อความดันสูงขึ้นอีกครั้ง ฟองก๊าซหรือไอนี้จะสลายตัวและกลับเป็นของเหลว โดยปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแรงกระแทก แรงกระแทกนี้ทำให้เกิดการสึกหรอหรือสึกกร่อนที่ผนังของเทอร์ไบน์หรือปั๊มน้ำ การสึกกร่อนนี้ไม่เพียงแต่สามารถทำให้เกิดความเสียหายแก่เทอร์ไบน์หรือปั๊มน้ำเท่านั้น แต่ยังสามารถทำให้เสียงดังรบกวน และยังสามารถลดประสิทธิภาพการทำงานของเทอร์ไบน์หรือปั๊มน้ำได้ด้วย

คาวิตีชันเกิดขึ้นเมื่อความดันในสารเหลวตกต่ำลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุดที่สารเหลวเริ่มปรับสภาพเป็นสถานะของก๊าซ สมการพื้นฐานที่อธิบายการเกิดคาวิตีชันคือสมการการแปรผันของความดัน (Bernoulli's Equation):

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{constant} \quad (1)$$

โดยที่

P คือ ความดันของสารเหลว

ρ คือ ความหนาแน่นของสารเหลว

v คือ ความเร็วของสารเหลว

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง และ

h คือ ความสูงของสารเหลวเมื่อวัดจากระดับอ้างอิงที่เลือก

เมื่อความดัน P ตกต่ำจนถึงระดับที่ต่ำกว่าความดันการระเหยของสารเหลวที่อุณหภูมิที่กำหนด (ซึ่งเรียกว่า ความดันเฉพาหรือ vapor pressure) สารเหลวจะเริ่มเปลี่ยนสภาพเป็นก๊าซ ซึ่งสร้างฟองก๊าซที่เรียกว่า "คาวิตีชัน" ที่ทำให้เกิดการสึกกร่อนและความเสียหายต่ออุปกรณ์

2. สมการพื้นฐาน (Governing Equations) และแบบจำลองคาวิตีชัน

2.1 สมการ Navier-Stokes

การไหลรอบไฮโดรพอยล์ สามารถอธิบายได้โดยสมการพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหลโดยเฉพาะสมการ Navier-Stokes สมการเหล่านี้เป็นพื้นฐานในการอธิบายการเคลื่อนที่ของของเหลวและใช้ได้กับทั้งของเหลวและก๊าซ

สมการ Navier-Stokes สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ล้อมรอบไฮโดรพอยล์สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้:

สมการความต่อเนื่อง:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2)$$

บทความวิชาการ (Academic Article)

สมการโมเมนตัม:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (3)$$

ซึ่ง:

- ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว
- v คือ ความเร็วของของไหล
- t คือ เวลาที่ใช้
- P คือ ความดัน
- μ คือ ความหนืดจลศาสตร์ของของไหล
- ∇ คือ กราเดียนท์โอเปอเรเตอร์
- ∇^2 คือ ลaplacian โอเปอเรเตอร์
- g คือ เวกเตอร์ความเร่งโน้มถ่วงของโลก

สมการความต่อเนื่อง แสดงถึงการอนุรักษ์มวล โดยสมการคือไดเวอร์เจนท์ของความหนาแน่นคูณ เวกเตอร์ความเร็ว (ρv) เท่ากับศูนย์ สมการนี้ช่วยให้แน่ใจได้ว่ามวลจะถูกอนุรักษ์ไว้ภายในขอบเขตของการไหล

สมการโมเมนตัม แสดงถึงการอนุรักษ์โมเมนตัม โดยพจน์ด้านซ้ายมือของสมการแสดงถึงความเร่งแบบชั่วคราวและการพาของเหลว (temporal and convective accelerations) ส่วนพจน์ด้านขวามือประกอบด้วยสามเทอม: แรงเนื่องจากความแตกต่างของระดับความดัน ($-\nabla P$), แรงหนืด ($\mu \nabla^2 v$) และแรงโน้มถ่วง (ρg) พจน์เหล่านี้แสดงถึงอิทธิพลของความดัน ความหนืดและแรงโน้มถ่วงต่อการไหลของของไหล

การแก้สมการเหล่านี้พร้อมกับเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมสามารถที่จะอธิบายลักษณะการไหล ล้อมรอบไฮโดรฟอยล์ โดยยังสามารถแสดงคุณลักษณะเหล่านี้ได้แก่ โปรไฟล์ความเร็ว การกระจายแรงดัน และแรงยกและลากที่กระทำต่อไฮโดรฟอยล์

อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญ คือ สมการ Navier-Stokes มีความซับซ้อนสูงและมักต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลขหรือการคำนวณสำหรับการแก้ไขปัญหาในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ยังมีการกำหนดสมมติฐานและทำให้สมการดังกล่าวมีความเรียบง่ายขึ้นและลดความซับซ้อนของสมการโดยขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการไหลที่เฉพาะเจาะจงและระดับความแม่นยำที่ต้องการ

2.2 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

ในการแก้สมการ Navier-Stokes ด้วยวิธีเชิงตัวเลขจะต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมเพื่อกำหนดพฤติกรรมของของเหลวที่ขอบเขตของโดเมนการคำนวณ เงื่อนไขขอบเขตเหล่านี้มักจะระบุเป็นความเร็วหรือความดันของเหลวบริเวณขอบเขตและสามารถใช้รูปแบบต่าง ๆ เช่น เงื่อนไขขอบเขต Dirichlet (ระบุค่าโดยตรง) หรือเงื่อนไขขอบเขต Neumann (ระบุค่าอนุพันธ์ปกติ)

เงื่อนไขขอบเขตทั่วไปที่ใช้ในการจำลองเชิงตัวเลขได้แก่ :

เงื่อนไขขอบเขตไม่ลื่นไถล (No-slip boundary condition) : เงื่อนไขนี้มีสมมติฐานว่าของเหลวเกาะติดกับขอบเขตส่งผลให้ความเร็วเป็นศูนย์ที่ผิวของขอบเขต

เงื่อนไขขอบเขตแบบลื่นไถล (Free-slip boundary condition) : เงื่อนไขนี้มีสมมติฐานว่าไม่มีความเค้นเฉือนที่ขอบเขตทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสมีระดับที่แตกต่างกันไป

เงื่อนไขของขอบเขตการไหลเข้า/ออก (Inflow/outflow boundary conditions) : เงื่อนไขเหล่านี้กำหนดความเร็วหรือความดันที่ขอบเขตที่ของเหลวเข้าหรือออกจากโดเมนการคำนวณ

เงื่อนไขขอบเขตเป็นคาบ (Periodic boundary conditions): เงื่อนไขเหล่านี้จำลองโดเมนอนันต์ (infinite domain) โดยการกำหนดโดเมนเป็นคาบ

บทความวิชาการ (Academic Article)

(periodic) ซึ่งหมายความว่าของเหลวที่ออกจากโดเมนด้านหนึ่งจะเข้าสู่อีกด้านหนึ่งจากฝั่งตรงข้าม

สมการ Navier-Stokes และเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมร่วมกันเป็นรากฐานสำหรับการจำลองเชิงตัวเลขของการไหลของของไหล โดยใช้วิธีการดิสครีตสมการในมิติของระยะทาง (space) และเวลา (time) ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite difference), ไฟไนต์อีลิเมนต์ (finite element), หรือไฟไนต์วอลุ่ม (finite volume) เทคนิคเหล่านี้สามารถใช้แก้ปัญหาคำนวณเชิงตัวเลขและหาคำตอบโดยประมาณของการตรวจจับพฤติกรรมการไหลของไหล

2.3 แบบจำลองคาวิตีเตชัน

แบบจำลองคาวิตีเตชันเป็นสิ่งจำเป็นในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเพื่อจัดการก่อตัวและพฤติกรรมของการเกิดคาวิตีเตชันอย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นการก่อตัวของบริเวณที่เต็มไปด้วยไอหรือฟองอากาศภายในของเหลวเนื่องจากความดันต่ำ แบบจำลองคาวิตีเตชันต่าง ๆ ได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มการแสดงผลต่าง ๆ ของการเกิดปรากฏการณ์คาวิตีเตชัน ซึ่งจะกล่าวถึงแบบจำลองที่ใช้กันทั่วไปสามแบบ: แบบเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) แบบพลวัตของฟอง (bubble dynamics) และแบบหลายเฟส (multiphase) ซึ่งในแต่ละแบบมีข้อดีและข้อจำกัด ดังนี้

2.3.1 แบบจำลองเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Cavitation Models): [1, 2]

แบบจำลองคาวิตีเตชันที่เป็นเนื้อเดียวกันจะถือว่าของเหลวทั้งหมดเป็นเฟสเดียว โดยสมมติว่ามีส่วนผสมของของเหลวและไอที่สม่ำเสมอ แบบจำลองเหล่านี้มักใช้ความสัมพันธ์แบบ empirical หรือสมการการถ่ายโอน (transport equation) เพื่อประมาณผลกระทบของคาวิตีเตชันต่อคุณสมบัติของไหล แบบจำลองที่เป็นเนื้อเดียวกันนี้มีประสิทธิภาพ

ในการคำนวณ แต่อาจขาดความแม่นยำในการจับพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงของฟองอากาศโดยละเอียด

สมการที่ใช้ในแบบจำลองการเกิดคาวิตีเตชันเป็นเนื้อเดียวกันมักจะเป็นการรวมกันของสมการความต่อเนื่อง, สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน และสมการจำลองการเปลี่ยนแปลงเฟส

ข้อได้เปรียบ:

- ความเรียบง่ายและประสิทธิภาพการคำนวณ
- เหมาะสำหรับการจำลองการไหลของคาวิตีเตชันขนาดใหญ่
- มีประโยชน์สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์เบื้องต้น

ข้อจำกัด:

- ไม่สามารถจับภาพพลวัตของฟองอากาศและการมีปฏิสัมพันธ์กับการไหล
- ความแม่นยำที่จำกัดในการทำนายปรากฏการณ์ในบริเวณเฉพาะ เช่น การยุบตัวของฟองอากาศและความกระเพื่อมของความดัน

2.3.2 แบบจำลองพลศาสตร์ฟองอากาศ (Bubble Dynamics Models): [3, 4]

แบบจำลองพลวัตของฟองมุ่งเน้นไปที่การจำลองพฤติกรรมของฟองอากาศแต่ละฟองภายในของเหลว แบบจำลองเหล่านี้ติดตามขนาดรูปร่างและการเคลื่อนไหวของฟองโดยพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ เช่น การเติบโตของฟองการยุบและการมีปฏิสัมพันธ์กับการไหลโดยรอบ มักจะใช้การคำนวณตามสมการ Rayleigh-Plesset หรือทฤษฎีพลวัตฟองอื่น ๆ

แบบจำลองพลวัตของฟองเน้นที่พฤติกรรมของฟองอากาศแต่ละฟองในระหว่างกระบวนการคาวิตีเตชัน พวกเขาอธิบายการเติบโตและการล่มสลายของฟองอากาศโพรงอากาศ ในขณะที่มันมีปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม หนึ่งในสมการกลางในแบบจำลอง

บทความวิชาการ (Academic Article)

พลศาสตร์ฟอง คือ สมการ Rayleigh-Plesset ซึ่งอธิบายการเคลื่อนที่ของผนังฟอง:

$$R'' + \frac{3}{2}(R')^2 = \frac{1}{\rho} \left(P_v - P_\infty - 4\mu \frac{R'}{R} - 2 \frac{\sigma}{R} \right) \quad (4)$$

ซึ่ง:

R คือรัศมีของฟองอากาศ

R' เป็นอนุพันธ์แรกของ R ที่เกี่ยวกับเวลา (เช่น อัตราการเปลี่ยนแปลงของรัศมีฟอง)

R'' เป็นอนุพันธ์ที่สองของ R ที่เกี่ยวกับเวลา (เช่น ความเร่งของผนังฟอง)

P_v คือความดันไอภายในฟองอากาศ

P_∞ คือความดันที่อินฟินิตี้ (ไกลจากฟองสปู)

μ คือความหนืดของของเหลว

σ คือแรงตึงผิว

ρ คือความหนาแน่นของของเหลว

ความดันภายในฟองอากาศโดยทั่วไปจะถือว่าคงที่และเท่ากับความดันไอของของเหลว

แบบจำลองพลวัตของฟองอากาศเหล่านี้มักจะต้องควบคู่ไปกับสมการการไหล (เช่นสมการ Navier-Stokes) และแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนเพื่อทำนายพฤติกรรมของฟองอากาศอย่างแม่นยำในสถานะที่แตกต่างกัน เนื่องจากฟองอากาศอาจส่งผลต่อสนามการไหลและสนามการไหลอาจส่งผลต่อฟองอากาศได้

ข้อได้เปรียบ:

- ความสามารถในการจับภาพการเปลี่ยนแปลงของฟองอากาศโดยละเอียดและผลกระทบ

- เหมาะสำหรับการจำลองปรากฏการณ์การเกิดควาวิเตชันในบริเวณเฉพาะเจาะจง

- ช่วยให้สามารถศึกษาการยุบตัวของฟองอากาศและคลื่นกระแทกที่เกี่ยวข้องได้

ข้อจำกัด:

- ต้นทุนการคำนวณที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองที่เป็นเนื้อเดียวกัน

- ความท้าทายในการจำลองอย่างแม่นยำของการยุบตัวของฟองอากาศและการรวมตัวกัน

- การใช้งานที่จำกัดสำหรับการจำลองการเกิดควาวิเตชันในปัญหาขนาดใหญ่

2.3.3 แบบจำลองควาวิเตชันแบบหลายเฟส

(Multiphase Cavitation Models):

แบบจำลองควาวิเตชันแบบหลายเฟส แสดงถึงของเหลวเป็นส่วนผสมของหลายเฟสโดยทั่วไปเป็นของเหลวและไอ แบบจำลองเหล่านี้เป็นการรวมกันของวิธี volume of fluids (VOF), level-set หรือวิธี Eulerian-Eulerian เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของเหลวและไอ วิธีดังกล่าวนี้ให้การแสดงปรากฏการณ์ cavitation ที่ครอบคลุมมากขึ้น รวมถึงการก่อตัวของฟองการเจริญเติบโตการยุบตัวและการมีปฏิสัมพันธ์กับการไหล

แบบจำลองควาวิเตชันแบบหลายเฟสให้คำอธิบายที่แม่นยำยิ่งขึ้นเกี่ยวกับกระบวนการโพรงอากาศโดยการรักษาของเหลวและไอเป็นสองชั้นตอนที่แยกจากกันและเชื่อมต่อกันซึ่งแต่ละชั้นตอนมีชุดสมการการอนุรักษ์ของตัวเอง แบบจำลองมักจะเกี่ยวข้องกับการแก้สมการ Navier-Stokes สำหรับทั้งสองเฟสพร้อมกับสมการสำหรับการถ่ายโอนมวลและพลังงานระหว่างเฟส

การอนุรักษ์มวลสำหรับแต่ละเฟส (สมการความต่อเนื่อง):

$$\frac{\partial \alpha_l \rho_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l u_l) = m_l \quad (4)$$

บทความวิชาการ (Academic Article)

โดยที่ α_l คือเศษส่วนปริมาตร ρ_l คือความหนาแน่น u_l คือความเร็วของเฟส l (l สำหรับของเหลว v สำหรับไอ) และ m_l คืออัตราการถ่ายโอนมวลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟส

การอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับแต่ละเฟส (สมการโมเมนตัม):

$$\frac{\partial \alpha_l \rho_l u_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l u_l^2) = -\alpha_l \nabla p + \nabla \cdot \tau_l + \alpha_l \rho_l g + F_l \quad (5)$$

โดยที่ p คือ ความดัน τ_l คือ เทนเซอร์ความเค้น g คือ แรงโน้มถ่วง และ F_l คือ แรงระหว่างเฟส

การอนุรักษ์พลังงานในแต่ละเฟส (สมการพลังงาน):

$$\frac{\partial \alpha_l \rho_l E_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l u_l E_l) = -p \nabla u_l + \nabla \cdot (\tau_l u_l) - \nabla \cdot q_l + S_l \quad (6)$$

โดยที่ E_l คือพลังงานทั้งหมดต่อหน่วยมวล q_l คือ เวกเตอร์ฟลักซ์ความร้อน และ S_l คือการถ่ายโอนพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟส

สมการการถ่ายโอนมวล:

สมการนี้อธิบายการเปลี่ยนแปลงเฟส (เช่นการเดือด/การระเหยและการควบแน่น) และโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิในบริเวณโลกคอล

ระบบของสมการเชิงอนุพันธ์ดังกล่าวข้างต้นจะถูกนำมาแก้สมการไปพร้อมกันและโดยทั่วไปจะแก้สมการโดยใช้วิธีการเชิงตัวเลข เช่น ไฟไนต์วอลุ่ม หรือวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องมี closure model ที่มีความเหมาะสมสำหรับแรง interfacial, tensor ความเครียด เวกเตอร์ฟลักซ์ความร้อนและเงื่อนไขการถ่ายเทมวลและพลังงาน

ข้อได้เปรียบ:

- การแสดงที่แม่นยำของพลวัตการเกิดคาวิตีที่ซับซ้อน

- ความสามารถในการจับภาพของการยุบตัวฟองอากาศ การรวมตัวและการมีปฏิสัมพันธ์กับบริเวณขอบเขต

- ใช้ได้กับสถานการณ์การเกิดคาวิตีที่หลากหลายน

ข้อจำกัด:

- เพิ่มความซับซ้อนในการคำนวณและความต้องการทรัพยากรในการประมวลผลที่สูงขึ้น

- ความท้าทายในการจำลองให้มีความแม่นยำสำหรับกระบวนการไหลของของไหลบริเวณรอยต่อ เช่น การเปลี่ยนเฟสและเงื่อนไขขอบเขตฟองอากาศ

3. วิธีเชิงตัวเลขและอัลกอริทึม:

การจำลองการไหลของคาวิตีที่ซับซ้อนรอบไฮโดรฟอยล์เป็นงานที่ท้าทายในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เนื่องจากลักษณะที่ซับซ้อนของปรากฏการณ์วิธีการเชิงตัวเลขมีบทบาทสำคัญในการสร้างแบบจำลองและทำนายพฤติกรรมของการไหลแบบคาวิตีที่ซับซ้อน วิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้กันทั่วไปมีสามวิธี ได้แก่ วิธี Finite Volume (FVM), Finite Element Method (FEM) และ Boundary Element Method (BEM) แต่ละวิธีมีจุดแข็งและจุดอ่อนของตัวเองซึ่งจะอธิบายไว้ดังต่อไปนี้

3.1 Finite Volume Method (FVM): [5, 6]

วิธี FVM ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการจำลองการไหลของคาวิตีที่ซับซ้อนรอบไฮโดรฟอยล์ ในวิธีนี้โดเมนการคำนวณจะถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมหรือเซลล์ขนาดเล็กและสมการที่ควบคุม (เช่นความต่อเนื่องและสมการ Navier-Stokes) จะถูกดิสครีตและถูกแก้สมการภายในขอบเขตของเซลล์เหล่านี้ FVM เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการจัดการรูปทรงที่ซับซ้อน

บทความวิชาการ (Academic Article)

และกริดที่ไม่มีโครงสร้าง (unstructured grids) มันถูกใช้อย่างประสบความสำเร็จในการศึกษาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหล cavitating รอบไฮโดรฟอยล์

ข้อได้เปรียบของ FVM:

สมการการอนุรักษ์ (Conservative): FVM เป็นที่รู้จักในด้านการสืบทอดคุณสมบัติที่มาจากสมการการอนุรักษ์ ทำให้เหมาะสำหรับการตรวจนับปริมาณทางกายภาพที่สำคัญ เช่น มวลโมเมนตัมและพลังงานอย่างแม่นยำ

จุดเด่น: FVM สามารถจัดการรูปทรงที่ซับซ้อนและกริดที่ไม่มีโครงสร้าง (unstructured grid) ให้มีความยืดหยุ่นในการสร้างแบบจำลองรูปทรงและการกำหนดค่าไฮโดรฟอยล์ต่าง ๆ

ความคงทน (robustness): โดยทั่วไปแล้ว FVM มีความคงทนและมีเสถียรภาพเชิงตัวเลขทำให้เหมาะสำหรับการจำลองการไหลของควาเวตซ์ที่เกี่ยวเนื่องกับฟิสิกส์ที่ซับซ้อนและพฤติกรรมชั่วครว (transient behavior)

ข้อเสียเปรียบของ FVM:

ข้อผิดพลาดในทำดีสคริต: ความแม่นยำของ FVM ขึ้นอยู่กับคุณภาพของกริดและรูปแบบการดีสคริตเชิงพื้นที่ (spatial discretization scheme) ที่ใช้ ข้อผิดพลาดสามารถเกิดขึ้นได้ในพื้นที่ที่มีความเปลี่ยนแปลงสูงหรือปรากฏการณ์การไหลที่ซับซ้อน

ความยืดหยุ่นที่จำกัดในการตรวจนับคุณสมบัติที่มีขนาดเล็ก: โดยทั่วไปแล้ว FVM เป็นวิธีการที่มีเซลล์เป็นศูนย์กลาง (cell-centered) ซึ่งอาจจำกัดความสามารถในกรณีที่คุณสมบัติที่ตรวจนับมีขนาดเล็กและมีรอยต่อที่ชัดเจนที่เกี่ยวเนื่องกับการไหลแบบควาเวตซ์

3.2 Finite Element Method (FEM): [7, 8]

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นอีกหนึ่งเทคนิคเชิงตัวเลขยอดนิยมสำหรับการจำลองกระแสการไหลแบบควาเวตซ์ FEM ทำการดีสคริตโดเมนการคำนวณออกเป็น

ตาข่าย (mesh) ขององค์ประกอบและประมาณคำตอบโดยใช้ฟังก์ชันที่อยู่บนฐานที่มีความต่อเนื่องกันเป็นชิ้น ๆ (piecewise continuous basis functions) สมการการไหลทั่วไปจะถูกแก้สมการในรูปแบบที่อ่อน (weak form) โดยใช้หลักการแปรผัน FEM เหมาะอย่างยิ่งสำหรับปัญหาเกี่ยวกับรูปทรงที่ซับซ้อนและตาข่ายที่ไม่มีโครงสร้าง (unstructured mesh)

ข้อได้เปรียบของ FEM:

ความยืดหยุ่นทางเรขาคณิต: FEM สามารถจัดการรูปทรงที่ซับซ้อนและขอบเขตที่มีความโค้งซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการจำลองรูปทรงไฮโดรฟอยล์ที่มีคุณสมบัติที่ซับซ้อน

การแสดงคำตอบที่แม่นยำ: FEM ช่วยให้สามารถทำการประมาณช่วงลำดับสูง (high-order interpolations) ทำให้สามารถแสดงตัวแปรการไหลได้อย่างแม่นยำและอัตราการลู่เข้า (convergence) ที่ดีขึ้น

การปรับแต่งแบบปรับได้ (Adaptive refinement): FEM รองรับเทคนิคการปรับแต่งตาข่ายแบบปรับได้ (adaptive mesh refinement) ทำให้สามารถปรับแต่งในบริเวณที่สนใจเช่นใกล้ขอบเขตของควาเวตซ์

ข้อเสียเปรียบของ FEM:

การสร้างรูปแบบที่ไม่อนุรักษ์การอนุรักษ์ (Non-conservative): สูตร FEM อาจไม่อนุรักษ์มวลโมเมนตัมและพลังงานภายในซึ่งต้องใช้มาตรการเพิ่มเติมเพื่อให้แน่ใจว่ามีการอนุรักษ์

ต้นทุนการคำนวณ: FEM ต้องการทรัพยากรในการคำนวณสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับปัญหาขนาดใหญ่เนื่องจากการแก้ปัญหาของระบบสมการขนาดใหญ่และความจำเป็นในการทำโครงตาข่ายใหม่ (re-meshing) ในการไหลควาเวตซ์แบบไดนามิก

3.3 Boundary Element Method (BEM): [9, 10]

วิธีการ BEM เป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่ดีสคริตเฉพาะขอบเขตของโดเมนการคำนวณมากกว่าปริมาตร

บทความวิชาการ (Academic Article)

ทั้งหมด BEM มุ่งเน้นไปที่ การแก้สมการอินทิกรัลขอบเขตที่ได้มาจากการแก้ปัญหาค่าพื้นฐานของสมการการไหลหลัก (Governing equations) วิธีนี้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบโพเทนเชียล (potential flow) ซึ่งมักจะใช้กับการไหลแบบคาวิตีชัน

ข้อได้เปรียบของ BEM:

การลดขนาดของมิติ: BEM ช่วยลดมิติของปัญหา โดยการตีความเฉพาะขอบเขตส่งผลให้ระบบสมการมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับวิธีการเชิงปริมาตร

มีประสิทธิภาพสำหรับปัญหาการไหลแบบโพเทนเชียล: BEM เหมาะอย่างยิ่งสำหรับปัญหาการไหลแบบโพเทนเชียลซึ่งสามารถใช้กับการไหลแบบ cavitating บางประเภทได้

การรักษาภาวะเอกฐาน (singularities) ที่แม่นยำ: BEM จัดการกับภาวะเอกฐานที่เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขขอบเขตได้แม่นยำกว่าวิธีการเชิงปริมาตร

ข้อเสียเปรียบของ BEM:

จำกัดเฉพาะการไหลแบบโพเทนเชียล: โดยทั่วไป BEM จะ จำกัดอยู่ที่ปัญหาการไหลแบบโพเทนเชียล และอาจไม่ตรวจจับผลกระทบที่มีความหนืดที่มีอยู่ในการไหลแบบคาวิตีชัน

ความไวต่อรูปทรงของวัตถุ: สมการของ BEM มีความไวต่อรูปทรงเรขาคณิตของปัญหา และรูปทรงเรขาคณิตที่ผิดปกติหรือซับซ้อนอาจก่อให้เกิดความท้าทายในการแก้ปัญหาที่ยากขึ้นได้

ความยากลำบากในการจัดการขอบเขตที่เคลื่อนที่ได้: การสร้างแบบจำลองกระแสคาวิตีชันแบบไดนามิกด้วยขอบเขตที่เคลื่อนที่ได้ อาจเป็นเรื่องที่ท้าทายและยากสำหรับเทคนิค BEM

สิ่งสำคัญคือต้องทราบว่า การเลือกวิธีการเชิงตัวเลขขึ้นอยู่กับข้อกำหนดเฉพาะของปัญหาทรัพยากรการคำนวณที่มีอยู่และความเชี่ยวชาญของนักวิจัยบ่อยครั้งที่การรวมกันของวิธีการเหล่านี้หรือวิธีการแบบไฮบริดถูกนำมาใช้เพื่อเอาชนะข้อจำกัดของแต่ละ

บุคคลและเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพของการจำลอง

อัลกอริธึมขั้นสูง เช่น Volume of Fluid (VOF), Level Set และ Phase-Field ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) สำหรับการตรวจจับปรากฏการณ์การไหลแบบคาวิตีชันที่ซับซ้อน วิธีการเหล่านี้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการจำลองและวิเคราะห์การไหลที่เกี่ยวข้องกับการก่อตัวและการยุบตัวของฟองอากาศภายในตัวกลางที่เป็นของเหลว ดังรายละเอียดต่อไปนี้:

3.4 วิธี Volume of Fluid (VOF): [11, 12]

วิธี VOF ใช้กันอย่างแพร่หลายในการจำลองการไหลของคาวิตีชันรอบๆ ไฮโดรฟอยล์ ช่วยให้สามารถติดตามอินเทอร์เฟซระหว่างไอกับของเหลวได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจจับการก่อตัว การสลัดออก (shedding) และปฏิสัมพันธ์ของคาวิตีชันกับพื้นผิวไฮโดรฟอยล์

ในการจำลองการไหลแบบคาวิตีชันรอบไฮโดรฟอยล์ วิธี VOF จะทำนายการเกิดและการเจริญเติบโตของคาวิตีชันได้อย่างแม่นยำ มันให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างรูปทรงไฮโดรฟอยล์ เงื่อนไขการไหลและรูปแบบการเกิดคาวิตีชันที่เกิดขึ้น ความสามารถของวิธี VOF ในการจัดการการเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่และการตรวจจับพฤติกรรมของการไหลหลายเฟสทำให้เหมาะสำหรับการศึกษาพลวัตของคาวิตีชันรอบๆ ไฮโดรฟอยล์

3.5 วิธี Level Set: [13, 14]

วิธี Level Set เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการจำลองการไหลของคาวิตีชันรอบไฮโดรฟอยล์ เนื่องจากสามารถจัดการการเปลี่ยนแปลงโทโพโลยีอินเทอร์เฟซที่ซับซ้อนและพลวัตของฟองอากาศได้ ช่วยให้สามารถศึกษาการเกิดคาวิตีชัน การเจริญเติบโตและการยุบตัวตลอดจนปฏิสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวไฮโดรฟอยล์และคาวิตีชันที่กำลังพัฒนา

บทความวิชาการ (Academic Article)

เมื่อนำไปใช้กับการจำลองการไหลแบบ cavitating รอบไฮโดรฟอยล์ วิธีการ Level Set จะตรวจจับพฤติกรรมที่ซับซ้อนของฟองอากาศ ปรากฏการณ์สลัดออกและรูปแบบของการไหล ช่วยให้สามารถวิเคราะห์รายละเอียดของปฏิสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรฟอยล์และฟองอากาศให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีค่าเกี่ยวข้องกับการหาสมรรถนะและประสิทธิภาพ

3.6 วิธี Phase-Field: [15]

วิธีการ Phase-Field เป็นเทคนิคอินเทอร์เฟซแบบกระจาย (diffuse interface technique) ที่แสดงถึงอินเทอร์เฟซเป็นพื้นที่การเปลี่ยนผ่านรอยต่ออย่างกลมกลืนแทนที่จะเป็นขอบเขตที่คมชัด ใช้ฟิลด์พารามิเตอร์ลำดับเพิ่มเติม (order parameter) เพื่ออธิบายการกระจายเฟสภายในโดเมนของไหล พารามิเตอร์ลำดับเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องที่แตกต่างกันอย่างราบรื่นทั่วทั้งอินเทอร์เฟซ วิวัฒนาการของพารามิเตอร์ลำดับถูกควบคุมโดยสมการ phase-field ซึ่งรวมถึงเทอมที่นำไปคิดพลังงานที่บริเวณอินเทอร์เฟซและปรากฏการณ์ทางกายภาพอื่น ๆ วิธี Phase-Field ช่วยให้สามารถจำลองการไหลของ cavitating ที่ซับซ้อนรวมถึงการเกิดนิวเคลียสของฟอง (bubble nucleation) การเจริญเติบโตและการยุบตัวรวมถึงปฏิสัมพันธ์กับแรงและสิ่งกีดขวางภายนอก

อัลกอริธึมขั้นสูงเหล่านี้มีข้อดีหลายประการสำหรับการจำลองการไหลของคาวิตชัน สามารถจัดการกับการเปลี่ยนรูปร่างขนาดใหญ่และโทโพโลยีอินเทอร์เฟซที่ซับซ้อน การตรวจจับพลวัตของการก่อตัวของฟองและการยุบตัวได้อย่างแม่นยำและจำลองปฏิสัมพันธ์แบบหลายเฟสกับพื้นผิวที่เป็นของแข็ง อย่างไรก็ตามแต่ละวิธีมีจุดแข็งและข้อจำกัดของตัวเองและการเลือกอัลกอริธึมขึ้นอยู่กับข้อกำหนดและลักษณะเฉพาะของปัญหา

4. การทำ Validation and Verification:

ข้อมูลการทดลองมีบทบาทสำคัญในการประเมินความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบคาวิตชันรอบ ๆ ไฮโดรฟอยล์ แหล่งข้อมูลการทดลองต่าง ๆ รวมถึงการถ่ายภาพความเร็วสูง การวัดความดัน และการวัดแรง/โมเมนต์ ที่ถูกประยุกต์ใช้ในบริบทของการไหลของ cavitating รอบไฮโดรฟอยล์ มีดังต่อไปนี้:

4.1 เทคนิคการสร้างภาพความเร็วสูง (High-Speed Visualization): [16, 17]

เทคนิคการสร้างภาพความเร็วสูงเช่นการถ่ายภาพความเร็วสูงหรือการถ่ายภาพด้วยเลเซอร์ให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีค่าเกี่ยวกับพฤติกรรมของฟองอากาศ การสลัดออกและการมีปฏิสัมพันธ์กับพื้นผิวไฮโดรฟอยล์ ข้อมูลการแสดงผลภาพช่วยตรวจสอบแบบจำลองตัวเลขโดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเกิดคาวิตชันที่คาดการณ์และสังเกตได้และปรากฏการณ์การสลัดออก (shedding)

4.2 เทคนิคการตรวจวัดความดัน (Pressure Measurements): [18, 19]

เทคนิคการตรวจวัดความดันให้ข้อมูลที่มีค่าเกี่ยวกับการกระจายของความดันบนพื้นผิวไฮโดรฟอยล์ในระหว่างการไหลผ่าน cavitating ข้อมูลทดลองการวัดความดันช่วยตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเชิงตัวเลข โดยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความดันที่คาดการณ์และวัดค่าของการกระจายแรงดัน

4.3 การตรวจวัดแรง/โมเมนต์ (Force/Moment Measurements): [20]

การวัดแรง/โมเมนต์ให้ข้อมูลเชิงปริมาณเกี่ยวกับแรงอุทกพลศาสตร์และช่วงเวลาที่เกิดต่อไฮโดรฟอยล์เนื่องจากการไหลของคาวิตชัน ข้อมูลการทดลองวัดแรง/โมเมนต์ช่วยตรวจสอบแบบจำลอง

บทความวิชาการ (Academic Article)

ตัวเลขโดยการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าคาดการณ์ และค่าที่วัดได้ของสัมประสิทธิ์การยก (lift) การลาก (drag) และโมเมนต์การพิทซิง (pitching moment)

5. Cavitating Flow Characteristics:

คาวีเตชันเป็นปรากฏการณ์ของการก่อตัวและการยุบตัวของฟองอากาศในของเหลวมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพและความทนทานของไฮโดรฟอยล์ การทำความเข้าใจลักษณะการไหลแบบคาวีเตชันรอบไฮโดรฟอยล์ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการปรับการออกแบบและการใช้งานให้เหมาะสม การทบทวนวรรณกรรมนี้ตรวจสอบแง่มุมต่าง ๆ ของการไหลของคาวีเตชันรอบไฮโดรฟอยล์ รวมถึงการเริ่มต้น การพัฒนาและการสลัดออกของกลุ่มเมฆคาวีเตชัน พลวัตของคาวีเตชันแผ่น / กลุ่มเมฆและอิทธิพลของสภาพการทำงานต่อรูปแบบการเกิดคาวีเตชัน นอกจากนี้ยังเน้นคุณสมบัติการไหลที่สำคัญ เช่น re-entrant jets คาวีเตชันหมุนวนปลายใบ (tip vortex cavitation) และพฤติกรรมที่ไม่คงที่ (unsteady) ที่ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับลักษณะที่ซับซ้อนของการไหลแบบคาวีเตชัน

5.1 การเกิดและการพัฒนาตัวของคาวีเตชัน (Inception and Development of Cavitation):[21, 22]

การเกิดคาวีเตชันเกิดขึ้นเมื่อความดันบริเวณนั้นลดลงต่ำกว่าความดันไอซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของฟองอากาศ เงื่อนไขที่แน่นอนสำหรับการเริ่มต้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น รูปทรงไฮโดรฟอยล์ ความเร็วในการไหลและคุณสมบัติของของเหลว เทคนิคการสร้างภาพความเร็วสูงได้เปิดเผยว่าการเกิดคาวีเตชันมักจะเริ่มต้นใกล้กับขอบด้านหน้า (leading edge) ของไฮโดรฟอยล์เนื่องจากการไหลถูกแยกออก (flow separation) เมื่อจำนวนคาวีเตชันลดลงเมฆคาวีเตชัน

จะมีขนาดเพิ่มขึ้นและขยายไปตามด้านดูด (suction side) ของไฮโดรฟอยล์

5.2 การสลัดออกของกลุ่มเมฆคาวีเตชัน (Shedding of Cavitation Clouds): [23, 24]

กลุ่มเมฆคาวีเตชันสลัดออกมาจากพื้นผิวไฮโดรฟอยล์เนื่องจากพฤติกรรมที่ไม่มั่นคงของการไหล กระบวนการสลัดออกเป็นลักษณะการก่อตัวและการปลดโครงสร้างกระแสน้ำวนขนาดใหญ่ เหตุการณ์เหล่านี้นำไปสู่การยุบตัวเป็นคาบเวลาของกลุ่มเมฆคาวีเตชันส่งผลให้เกิดความผันผวนของความดันและความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับไฮโดรฟอยล์ ความถี่และลักษณะการสลัดออกได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆเช่น ความเร็วในการไหลรูปทรงไฮโดรฟอยล์และสภาพการทำงาน

5.3 พลศาสตร์คาวีเตชันแบบแผ่น/เมฆ (Sheet/Cloud Cavitation Dynamics): [25, 26]

คาวีเตชันแบบแผ่น หมายถึง การมีแผ่นคาวีเตชันอย่างต่อเนื่องและขยายตัวบนพื้นผิวไฮโดรฟอยล์ มักจะมาพร้อมกับกลุ่มเมฆคาวีเตชันซึ่งฟองอากาศที่ไม่ต่อเนื่องก่อตัวและยุบตัวภายในแผ่น ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแผ่นและกลุ่มเมฆคาวีเตชันอย่างมีนัยสำคัญส่งผลกระทบต่อแรงพลศาสตร์การไหลที่ท่าหน้าที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรฟอยล์ พลวัตของการเกิดคาวีเตชันแบบแผ่น/เมฆเกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อน รวมถึงการก่อตัวของ re-entrant jet การสลัดออกของฟองอากาศ และความไม่เสถียรของฟองอากาศ

5.4 อิทธิพลของสภาวะการทำงาน (Influence of Operating Conditions): [27, 28]

ลักษณะของการไหลแบบคาวีเตชันรอบไฮโดรฟอยล์ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากสภาพการทำงานที่หลากหลาย ความเร็วการไหลมุมไฮโดรฟอยล์ของการโจมตีจำนวนคาวีเตชันและหมายเลข Reynolds มีบทบาทสำคัญในการกำหนดรูปแบบคาวีเตชันและ

บทความวิชาการ (Academic Article)

พลวัต การเปลี่ยนแปลงในสภาพการทำงานเหล่านี้สามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงระหว่างควาติเตชันประเภทต่าง ๆ เช่น ควาติเตชันแบบแผ่น ควาติเตชันแบบคลาวด์ หรือซูเปอร์ควาติเตชัน

5.5 คุณสมบัติการไหลที่สำคัญ: [29, 30]

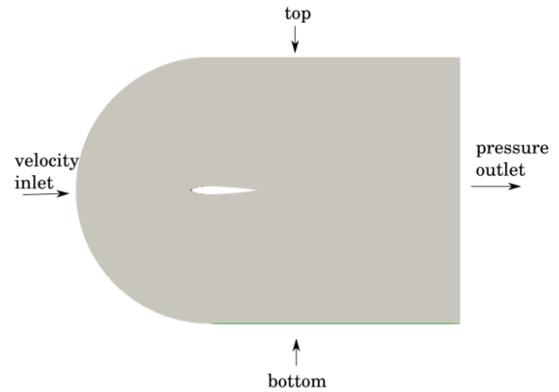
คุณสมบัติการไหลที่สำคัญหลายประการเกี่ยวข้องกับการไหลแบบควาติเตชันรอบไฮโดรฟอยล์ Re-entrant jets ซึ่งเกิดจากการยุบตัวของกลุ่มเมฆควาติเตชันส่งผลให้เกิดบริเวณความกดอากาศสูงในบริเวณนั้นและอาจทำให้เกิดการกัดเซาะบนพื้นผิวไฮโดรฟอยล์ การเกิดควาติเตชันของกระแสน้ำวนปลายใบ (tip vortex) เกิดขึ้นใกล้กับขอบต่อท้าย (trailing edge) ของไฮโดรฟอยล์ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างกระแสน้ำวนปลายใบและกลุ่มเมฆควาติเตชัน พฤติกรรมที่ไม่คงที่ (unsteady) แสดงถึงการสัดออกของกระแสน้ำวนและการยุบตัวของควาติเตชันเป็นคาบเวลา ซึ่งเพิ่มความซับซ้อนให้การไหลแบบควาติเตชัน

6. กรณีศึกษา

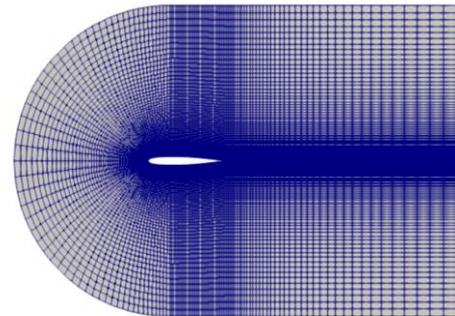
ไทยทัศน์และคณะ [31] ได้ทำการจำลองการไหลไฮโดรฟอยล์ โมเดล NACA 0015 โดยได้กำหนดโดเมนขอบเขตดังรูปที่ 1 และได้สร้างกริดแบบ unstructured grid แบบ curvilinear quadrilateral ดังรูปที่ 2 ความเร็วที่ทางเข้า 12 m/s ความดันที่ทางออก 74,200 pa อุณหภูมิกระแสการไหล 293 K ความหนาแน่นของน้ำ 998.2 kg/m³ ความเร็วเสียงของน้ำ 1,537.6 m/s และควาติเตชันนัมเบอร์ = 1

ในการวิจัยนี้ได้ใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ Ansys CFX เป็นเครื่องมือในการคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume) สำหรับการวิเคราะห์แบบชั่วคราว (transient) นั้นถูกตีสคริตตามรูปแบบออยเลอร์ย้อนกลับลำดับที่สอง ในขณะที่การมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างความดันและความเร็วโดยใช้เทคนิค Rhie

และ Chow [32] สำหรับเทอมของ advection ใช้รูปแบบความแตกต่าง upwind ลำดับที่สอง (second order upwind difference scheme)



รูปที่ 1 โดเมนขอบเขตการจำลอง

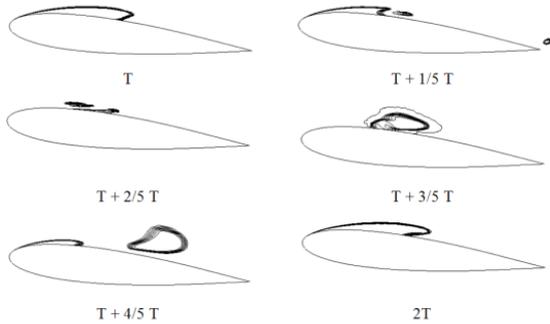


รูปที่ 2 กริดแบบ curvilinear quadrilateral [33]

สแต็ปเวลาที่ใช้จำลองคือ 0.0001 วินาที ค่า residue สูงสุดถูกตั้งไว้ต่ำกว่า 10⁻⁴ เป็นเกณฑ์การลู่เข้า convergence แบบจำลองควาติเตชันนั้นได้รับการกำหนดค่าด้วยสัดส่วนปริมาตรก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (non-condensable gas volume fraction) คือ 5x10⁻⁴ โดยการเพิ่มสัดส่วนปริมาตรก๊าซที่ไม่สามารถควบแน่นได้ในแบบจำลองจะช่วยเพิ่มพลวัตของระบบ ความดันไอ P_v ตั้งไว้ที่ 3,540 Pa ควาติเตชันนัมเบอร์ถูกปรับโดยการเปลี่ยนความดันที่สถานะอ้างอิง P_{ref} แบบจำลองเทอร์บิวเลนซ์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแบบจำลอง k- ω ที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous fluid) เพื่อพิจารณาในกรณีที่มีการ

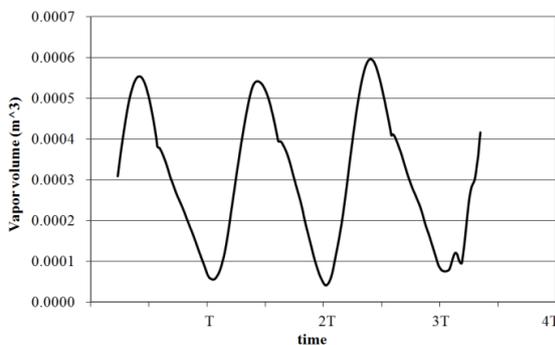
บทความวิชาการ (Academic Article)

คำนวณการไหลของควาเวตชั้นโดยรวมถึงผลของการ
อัดตัวได้



รูปที่ 3 พฤติกรรมของควาเวตชั้นไฮโดรฟอยล์ [31]

ผลลัพธ์เชิงตัวเลขสามารถทำนายผลลัพธ์ที่ต้องการ
ของการไหลแบบไม่คงที่ที่แสดงในรูปที่ 3 เนื่องจาก
ด้านดูด (suction) ของ hydrofoil มีความดันต่ำมาก
น้ำในโซนนั้นถูกเปลี่ยนสถานะเป็นไอที่บริเวณพื้นผิว
ของไฮโดรฟอยล์ที่เรียกว่าควาเวตชั้น เมื่อโพรงควาเวตที่มี
ขนาดใหญ่ขึ้นกระแสไหลย้อน re-entrant jet ที่เข้า
มาใหม่จากปลายน้ำก็เกิดขึ้น อิทธิพลของกระแสไหล
ย้อนทำให้โครงสร้างของโพรงแตกออกและบางส่วน
เคลื่อนไหวไปสู่ปลายน้ำที่เรียกว่า "การสลัดออกของ
ควาเวต" และมันยุบตัวลงเมื่อถึงโซนความกดอากาศสูง
ขณะเดียวกันควาเวตใหม่ที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้นและ
กระแสไหลย้อนใหม่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตาม
คาบเวลาเวลา ในรูปที่ 4 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลง
ปริมาตรของไอในแต่ละคาบเวลา



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงเชิงเวลาของปริมาตรไอ [31]

7. บทสรุป

เทคนิคการจำลองเชิงตัวเลขมีบทบาทสำคัญใน
การพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับการไหลแบบควาเวตชั้น
รอบไฮโดรฟอยล์ บทความนี้อธิบายให้เห็นถึงภาพรวม
ที่ครอบคลุมของเทคนิคที่ใช้ในการจำลองการไหล
แบบควาเวตชั้นในไฮโดรฟอยล์ การรวมแบบจำลองเชิง
ตัวเลขที่มีความถูกต้องแม่นยำ เทคนิคการตรวจสอบ
ความถูกต้องของแบบจำลอง รวมถึงคุณลักษณะของ
การไหลแบบควาเวตชั้นในไฮโดรฟอยล์

การจำลองการไหลของควาเวตชั้นในไฮโดรฟอยล์
นั้นมีความสำคัญอย่างมากในการทำความเข้าใจและ
พัฒนาการออกแบบของอุปกรณ์ที่มีความสำคัญ
อย่างเช่น เทอร์ไบน์ ปัม เรือ และวัตถุที่ใช้ใน
เทคโนโลยีน้ำมันและก๊าซ ในการศึกษาที่มีเทรนด์ที่
ชัดเจนดังนี้:

1. การใช้แบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้น: การใช้
แบบจำลองที่จำแนกของเหลวและก๊าซ (multiphase
cavitation models) กำลังเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมัน
สามารถจำลองปรากฏการณ์ควาเวตชั้นได้แม่นยำมาก
ขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองควาเวตชั้นแบบเดียว หรือ
homogeneous cavitation models.

2. การใช้วิธีการคำนวณที่สูงขึ้น: การใช้วิธีการที่มี
ความละเอียดสูง เช่น Large Eddy Simulation
(LES) และ Direct Numerical Simulation (DNS)
เพื่อจำลองปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน อย่างเช่น การสร้าง
และการพังทลายของโพรงควาเวตชั้น

3. การจำลองการตอบสนองของโครงสร้างเมื่อ
เกิดควาเวตชั้น: เนื่องจากควาเวตชั้นสามารถส่งผล
กระทบต่อโครงสร้างทางกล การศึกษาและจำลองการ
ตอบสนองของโครงสร้างในสถานการณ์เหล่านี้ก็เป็นที่
สนใจ

4. การศึกษาทางทฤษฎีและการทดลอง: ทั้ง
การศึกษาและการทดลองก็ยังคงเป็นส่วนสำคัญในการ
พัฒนาและตรวจสอบแบบจำลองควาเวตชั้น

บทความวิชาการ (Academic Article)

เรื่องที่ควรได้รับความสนใจในอนาคตอาจรวมถึงการพัฒนาแบบจำลองคาวิตีเตชันที่มีความแม่นยำมากขึ้น การใช้เทคนิคการคำนวณที่มีความละเอียดสูงขึ้น เช่น DNS และ LES, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคาวิตีเตชันและการสึกหรอของโครงสร้าง และการพัฒนาวิธีการทดลองใหม่ๆ สำหรับการวัดและการสังเกตคาวิตีเตชัน

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Brennen, C.E. Cavitation and Bubble Dynamics: Oxford University Press, 1995.
- [2] Singhal, A.K. (2002). Mathematical basis and validation of the full cavitation model. Journal of Fluids Engineering. 124.3. 617-24.
- [3] Lauer, E., Hu, X.Y., Hickel, S. and Adams, N.A. (2012). Numerical modelling and investigation of symmetric and asymmetric cavitation bubble dynamics. Computers & Fluids. 69. 1-19.
- [4] Chahine, G.L., Kapahi, A., Choi, J.-K. and Hsiao, C.-T. (2016). Modeling of surface cleaning by cavitation bubble dynamics and collapse. Ultrasonics Sonochemistry. 29. 528-49.
- [5] Daude, F., Tijsseling, A.S. and Galon, P. (2018). Numerical investigations of water-hammer with column-separation induced by vaporous cavitation using a one-dimensional Finite-Volume approach. Journal of Fluids and Structures. 83. 91-118.
- [6] Barberon, T. and Helluy, P. (2005). Finite volume simulation of cavitating flows. Computers & Fluids. 34(7). 832-58.
- [7] Kumar, A. and Booker, J.F. (1991). A Finite Element Cavitation Algorithm. Journal of Tribology. 113. 276-86.
- [8] Bayada, G., Chambat, M. and Alaoui, M.E. (1990). Variational Formulations and Finite Element Algorithms for Cavitation Problems. Journal of Tribology. 112. 398-403.
- [9] Fine, N.E. and Kinnas, S.A. (1993). A Boundary Element Method for the Analysis of the Flow Around 3-D Cavitating Hydrofoils. J Ship Res. 37. 213-24.
- [10] Lee, H. and Kinnas, S.A. (2004). Application of a Boundary Element Method in the Prediction of Unsteady Blade Sheet and Developed Tip Vortex Cavitation on Marine Propellers. J Ship Res. 48. 15-30.
- [11] Passandideh-Fard, M. and Roohi, E. (2008). Transient simulations of cavitating flows using a modified volume-of-fluid (VOF) technique. International Journal of Computational Fluid Dynamics. 22(1-2). 97-114.
- [12] Koch, M., Lechner, C., Reuter, F., Köhler, K., Mettin, R. and Lauterborn, W. (2016). Numerical modeling of laser generated cavitation bubbles with the finite volume and volume of fluid method, using OpenFOAM. Computers & Fluids. 126. 71-90.
- [13] Huang, J. and Zhang, H. (2007). Level set method for numerical simulation of a cavitation bubble, its growth, collapse

บทความวิชาการ (Academic Article)

- and rebound near a rigid wall. *Acta Mech Sin.* 23. 645–53
- [14] Yu A, Tang Q and D, Z. (2019). Cavitation Evolution around a NACA0015 Hydrofoil with Different Cavitation Models Based on Level Set Method. *Applied Sciences.* 9(4). 758.
- [15] KINOSHITA, T., KIMURA, R. and HAGIWARA, Y. (2016). Numerical Simulation of Carbon-dioxide Bubbles in Water Flow Using a Phase-field Method. *Japanese journal of multiphase flow.* 29(5). 533-41.
- [16] Kravtsova, A.Y., Markovich, D.M., Pervunin, K.S., Timoshevskiy, M.V. and Hanjalić, K. (2014). High-speed visualization and PIV measurements of cavitating flows around a semi-circular leading-edge flat plate and NACA0015 hydrofoil. *International Journal of Multiphase Flow.* 60. 119-34.
- [17] Yamamoto, K. (2014). Pressure measurements and high speed visualizations of the cavitation phenomena at deep part load condition in a Francis turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 22.
- [18] Pham, T.M., Larrarte, F. and Fruman, D.H. (1999). Investigation of Unsteady Sheet Cavitation and Cloud Cavitation Mechanisms. *ASME J Fluids Eng.* 121(2). 289–96.
- [19] Sreedhar, B.K., Albert, S.K. and Pandit, A.B. (2017). Cavitation damage: Theory and measurements – A review. *Wear.* 372–373. 177-96.
- [20] Nouri, N.M., Kamran, M., Mostafapur, K. and Bahadori, R. (2015). Design and fabrication of a force-moment measurement system for testing of the models in a water tunnel. *Modares Mechanical Engineering.* 14(14). 291-8.
- [21] Astolfi, J.-A., Leroux, J.-B., Dorange, P., Billard, J.-Y., Deniset, F. and Fuente, S.d.L. (2000). An Experimental Investigation of Cavitation Inception and Development on a Two-Dimensional Hydrofoil. *J Ship Res.* 44. 259–69.
- [22] Ye, W., Yi, Y. and Luo, X. (2020). Numerical modeling of unsteady cavitating flow over a hydrofoil with consideration of surface curvature. *Ocean Engineering.* 205.
- [23] Long, X., Cheng, H., Ji, B. and Arndt, R.E.A. (2017). Numerical investigation of attached cavitation shedding dynamics around the Clark-Y hydrofoil with the FBDCM and an integral method. *Ocean Engineering.* 137. 247-61.
- [24] Liu, J., Yu, J., Yang, Z., He, Z., Yuan, K., Guo, Y. (2021). Numerical investigation of shedding dynamics of cloud cavitation around 3D hydrofoil using different turbulence models. *European Journal of Mechanics - B/Fluids.* 85. 232-44.
- [25] Liu, Y., Wu, Q., Huang, B., Zhang, H., Liang, W. and Wang, G. (2021). Decomposition of unsteady sheet/cloud cavitation dynamics in fluid-structure interaction via POD and DMD methods. *International Journal of Multiphase Flow.* 142. 103690.

บทความวิชาการ (Academic Article)

- [26] Movahedian, A., Pasandidehfard, M. and Roohi, E. (2019). LES investigation of sheet-cloud cavitation around a 3-D twisted wing with a NACA 16012 hydrofoil. *Ocean Engineering*. 192. 106547.
- [27] Wang, W., Li, Z., Liu, M. and Ji, X. (2021). Influence of water injection on broadband noise and hydrodynamic performance for a NACA66 (MOD) hydrofoil under cloud cavitation condition. *Applied Ocean Research*. 115. 102858.
- [28] Sun, H. (2012). Numerical study of hydrofoil geometry effect on cavitating flow. *J Mech Sci Technol*. 26. 2535–45.
- [29] Wang, Z., Cheng, H. and Ji, B. (2021). Numerical investigation of condensation shock and re-entrant jet dynamics around a cavitating hydrofoil using a dynamic cubic nonlinear subgrid-scale model. *Applied Mathematical Modelling*. 100. 410-31.
- [30] LIU, Z.-h., WANG, B.-l., PENG, X.-x. and LIU, D.-c. (2016). Calculation of tip vortex cavitation flows around three-dimensional hydrofoils and propellers using a nonlinear $k-\epsilon$ turbulence model. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*. 28(2). 227-37.
- [31] Sudsuansee, T., Nontakaew, U. and Tiaple, Y. (2011). Simulation of leading edge cavitation on bulb turbine. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 33.
- [32] Rhie, C. and Chow, W. (1983). Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. *AIAA J* 21. 1525–32.
- [33] Kasi, V. A Review of Numerical Models for the Simulation of Cavitating Flows in Hydrofoils, Thesis: Politecnico di Milano, 2021.