บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

2.1 ลักษณะการเคลื่อนตัวของตะกอน

การเคลื่อนตัวของตะกอนอาจแบ่งออกได้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งการเคลื่อนตัวอาจจะเป็นวิธีเดียวหรือหลายวิธีผสมกัน ยิ่งกว่านั้นตะกอนอาจเคลื่อนตัวด้วยวิธีการหนึ่ง ในช่วงระยะเวลาหนึ่งและเคลื่อนตัวด้วยวิธีการอื่นต่อไปก็ได้

การเคลื่อนตัวของตะกอนอาจแบ่งออกตามจำกัดความได้สามลักษณะด้วยกัน คือ การแขวนลอย (suspension) การสัมผัส (contact) และการกระโดด (saltation)

โดยทั่วไปแล้วตะกอนแขวนลอย ประกอบด้วยอนุภาควัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าตะกอน ซึ่งเคลื่อนตัวสัมผัสไปกับท้องน้ำด้วยแรง tractive forces วิธีการเคลื่อนของตะกอนท้องน้ำในลักษณะกระโดดนั้น จะแยกออกจากการเคลื่อนตัวแบบสัมผัสไปตามท้องน้ำ และขนาดตะกอนจะใหญ่กว่าตะกอนที่เคลื่อนตัวแบบแขวนลอย ตะกอนที่เคลื่อนตัวแบบกระโดดนี้ มีความสำคัญในทางอุทกวิทยาน้อยมาก เพราะมีจำนวนน้อยเมื่อเปรียบเทียบตะกอนประเภทอื่น

ในลำน้ำส่วนมาก ตะกอนจะเคลื่อนตัวด้วยสองลักษณะ หรือทั้งสามลักษณะผสมกันตะกอนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะเคลื่อนตัวสัมผัสไปตามท้องน้ำ สำหรับภายในชั้นความหนาบางๆ เหนือท้องน้ำตะกอนจะมีลักษณะหยาบและมีความเข้มข้นสูง ตะกอนเหล่านี้จะเคลื่อนตัวในลักษณะสัมผัส หรือกระโดดหรือทั้งสองวิธีผสมกัน ส่วนตะกอนแขวนลอยจะเคลื่อนที่เหนือชั้นความหนา $> 2d_{50}$ จนถึงผิวน้ำตะกอนแขวนลอยจะมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับตะกอนทั้งหมดในลำน้ำ

2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำและตะกอน

ปริมาณตะกอนแขวนลอยในลำน้ำอาจจะวัดปริมาณและความเข้มข้นได้ด้วยการเก็บตัวอย่างที่มีตะกอนดังกล่าวปะปนอยู่ นำตัวอย่างน้ำปนตะกอนเข้าห้องปฏิบัติการ ในขั้นแรกก็จะต้องชั่งน้ำหนักตัวอย่างน้ำปนตะกอนก่อน ต่อจากนั้นก็จะทำการแยกตะกอนออกจากน้ำด้วยการกรองหรือโดยการทำให้น้ำระเหยไป จากนั้นก็ทำตะกอนที่แยกออกมาให้แห้งโดยใช้เตาอบ เมื่อตะกอนแห้งดีแล้วก็นำไปชั่งน้ำหนักหน่วยการวัดตะกอนเรียกว่า จำนวนส่วนในหนึ่งล้านส่วน (parts per-million) มีชื่อย่อเป็นภาษาอังกฤษว่า ppm คำนวณได้ด้วยการหารน้ำหนักแห้งของตะกอนด้วยน้ำหนักน้ำปนตะกอน และคูณอัตราส่วนที่ได้ด้วยล้าน เครื่องมือเก็บตะกอนจะออกแบบให้มีการกระทบกระเทือนต่อการไหลของน้ำ โดยเฉพาะ streamlines น้อยที่สุด เพื่อตัวอย่างน้ำและตะกอนแขวนลอยที่เก็บได้จะเป็นตัวแทนตะกอนแขวนลอยที่แท้จริงของลำน้ำ

ปริมาณตะกอนแขวนลอย หรือความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอยจะแปรผันตามความลึกของน้ำ และยังแปรผันตามความกว้างของลำน้ำด้วย กล่าวคือในแต่ละส่วนของพื้นที่รูปตัดของน้ำ ซึ่งมีตะกอนไหลผ่าน ความเข้มข้นของตะกอนจะแตกต่างกัน การเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอยอาจจะกระทำได้จากการเก็บตัวอย่างที่จุดความลึกที่กำหนด หรืออาจเป็นการเก็บตลอดความลึกของลำน้ำ ซึ่งเรียกว่า integrated depth sampling การนำเอาผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปหาปริมาณของตะกอนแขวนลอยเฉลี่ยทั้งรูปตัดลำน้ำ หรือเฉลี่ยในแนวตั้งใดๆ จะต้องทำความเข้าใจการเก็บตัวอย่างว่าได้เก็บตัวอย่างที่ความลึกใดหรือเป็นการเก็บตลอดความลึกดังกล่าว นอกจากนั้นหากลำน้ำมีความกว้างมากๆ จำเป็นต้องเก็บตัวอย่างตะกอนแขวนลอย โดยแบ่งส่วนความกว้างผิวน้ำเป็นช่วงๆ

ในทางปฏิบัตินั้นการเก็บตัวอย่างตะกอนท้องน้ำ (bed load) กระทำได้ยากและไม่เป็นที่นิยมกระทำกัน เนื่องจากการเก็บตัวอย่างที่จะได้ตัวแทนที่แท้จริงโดยการไปตักตะกอนท้องน้ำมากระทำได้ยาก

หน่วยงานหลักในประเทศไทยที่ทำการเก็บตัวอย่างตะกอนในลำน้ำก็คือ กรมชลประทาน การพลังงานแห่งชาติ และการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ข้อมูลที่เก็บได้ส่วนใหญ่จะเป็นตะกอนแขวนลอยในขณะ

ที่เก็บตัวอย่างหรือทำการวัดตะกอนนั้น ต้องทำการวัดปริมาณการไหลของน้ำด้วย ทั้งนั้นเพื่อจะได้นำมาวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการไหลของตะกอน และปริมาณการไหลของน้ำ

2.3 <u>รูปแบบลักษณะความขรุขระของท้องน้ำ (Forms of bed roughness)</u>

การเคลื่อนที่ของตะกอนในลำน้ำ ทำให้เกิดรูปแบบความขรุขระของท้องน้ำไว้หลายลักษณะ สำหรับลำน้ำประเภท alluvial channels ซึ่งตะกอนทรายท้องน้ำเคลื่อนที่โดยการพัดพาของกระแสน้ำ จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ พบว่า

1. ที่ความเร็วของการไหลต่ำมาก จะไม่พบการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายท้องน้ำเลย

2. ถ้าความเร็วของอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นถึงค่าๆ หนึ่ง จะเริ่มเห็นการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายท้องน้ำ และต่อไปรูปแบบของท้องน้ำก็จะเกิดเป็นรูปคลื่นเล็กๆ เรียกว่า "ริปเปิ้ล (Ripple)" ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก)

3. ถ้าเพิ่มความเร็วของการไหลขึ้นไปอีก ลักษณะรูปคลื่นทรายท้องน้ำจะใหญ่ขึ้น เรียกว่า "ดูน (Dunes)" ในช่วงแรก ๆ ดูน (Dune) จะมีริปเปิ้ล (Ripple) อยู่ด้วย (รูปที่ 1 (ข)) ต่อเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นอีก ริปเปิ้ล (Ripple) จะหายไปเหลือแต่ดูน (Dune) (รูปที่ 1 (ค))

4. ถ้าเพิ่มความเร็วการไหลขึ้นอีก ลักษณะดูน (Dune) จะค่อยๆ หายไป ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า "ทรานซิชั่น (Transition)" รูปที่ 1 (ง) เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นจนกระทั่งกลายเป็นพื้นราบ (Plane bed)" อีกครั้ง (รูปที่ 1 (จ))

5. เมื่อเพิ่มความเร็วมากกว่าข้อ 4 จนกระทั่งเกิดคลื่นท้องน้ำขึ้นอีก พร้อมทั้งคลื่นที่ผิวน้ำด้วย เรียกว่า "แสตนดิ้ง เวฟ (Standing wave)" รูปที่ 1 (ฉ)

6. ถ้าเพิ่มความเร็วของการไหลขึ้นอีก คลื่นน้ำจะเริ่มเกิดการแตก (Break water) และตะกอนทรายท้องน้ำ จะเคลื่อนที่กลับไปทางต้นน้ำ (Upstream) ท้องน้ำจะมีลักษณะเรียกว่า "แอนติดูน (Antidune)" (รูปที่ 1 (ช)) และเมื่อเพิ่มความเร็วการไหลขึ้นอีก ท้องน้ำก็จะเกิดลักษณะที่เรียกว่า Violent Antidune

2.4 สมการการเคลื่อนที่ของตะกอน

มีสมการหลายลักษณะที่ถูกเสนอขึ้นโดยนักวิจัยทางด้านชลศาสตร์ เพื่อใช้คำนวณหาปริมาณตะกอนที่เคลื่อนที่อันได้แก่ ตะกอนท้องน้ำ (Bed load) ตะกอนแขวนลอย (suspended load) และตะกอนทั้งหมด (Total load) ซึ่งสมการที่ใช้ในการประมาณอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนในลำน้ำ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรกเป็นสมการที่เรียกว่าเอมไพริกัล และประเภท 2 เป็นกึ่งเอมไพริกัล สมการแต่ละประเภทมีทั้งข้อดี ข้อเสีย แตกต่างกันออกไป

ซึ่งสมการต่างๆ เหล่านี้ ถูกทำให้อยู่ในรูปของ 2 dimensionless parameter โดยที่ทั้ง 2 จะมีความสัมพันธ์กันในรูปแบบ

$$\phi = \alpha\psi^{\beta} \qquad (2\text{-}1)$$

$$\phi = \text{transport parameter} = \frac{q_b}{\left[D^{3/2}(g\Delta)^{1/2}\right]} \qquad (2\text{-}2)$$

$$\psi = \text{Flow Parameter} = \frac{\mu h s}{\Delta D} \qquad (2\text{-}3)$$

q_b = flow bed load (tons/day)

$$\Delta = \text{Relative density } \Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w \qquad (2\text{-}4)$$

D = Diameter of Sediment

μ = Ripple factor

h = depth of water S = Slope

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำ

2.4.1. สมการ Meyer-Peter & Muller (1948)

$$\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w \qquad (2\text{-}5)$$

$$C' = 18 \log \frac{12h}{D_{90}} \qquad (2\text{-}6)$$

$$C = \frac{\bar{U}}{(hs)^{0.5}} \qquad (2\text{-}7)$$

$$\mu = (C/C')^{3/2} \qquad (2\text{-}8)$$

$$\phi = \frac{\mu hs}{(\Delta \underline{D})} \quad \text{โดยมี} \quad D = D_m \qquad (2\text{-}9)$$
$$1000$$

$$D_m = \bar{D} = \Sigma\, p.D/\Sigma p \qquad (2\text{-}10)$$

ถ้า $\phi < 0.047$, แล้ว $\phi = 0.047$

$$\psi = (4\phi - 0.188)^{1.5} \qquad (2\text{-}11)$$

$$q_{s.v} = B\psi\left[D^{3/2}(g\Delta)^{1/2}\right] \qquad (2\text{-}12)$$

$$q_b = 86400\, \rho_s\, q_{s.v} \qquad (2\text{-}13)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4.2. สมการ ENGELUND AND HANSEN

$$\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w \qquad (2\text{-}14)$$

$$C = \frac{\overline{U}}{(hs)^{0.5}} \qquad (2\text{-}15)$$

$$f = \frac{2g}{C^2} \qquad (2\text{-}16)$$

$$\Phi = \frac{hs*1000}{(\Delta D_{50})} \qquad (2\text{-}17)$$

$$\Psi = 0.1 f^{-1} \Phi^{2.5} \qquad (2\text{-}18)$$

$$q_{sv} = B\Psi\left[D^{3/2}(g\Delta)^{1/2}\right] \qquad (2\text{-}19)$$

$$q_b = 86400\ \rho_s\ q_{sv} \qquad (2\text{-}20)$$

2.4.3. สมการ Ackers and white

$$\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w \qquad (2\text{-}21)$$

$$D_* = 10\ D_{35}\left[\frac{(\Delta g)}{\nu^2}\right]^{1/3} \qquad (2\text{-}22)$$

ถ้า $D_* > 60$

กรณี $U_* = U_*$ $\quad U_* = ghs$

$N = 0$ $\quad M = 1.50$

$A = 0.17$ $\quad C = 0.025$

$$U_* = \bar{U} / [5.64 \log \left[\frac{h * 10000}{D_{35}}\right]] \quad (2\text{-}23)$$

$$U_* = (ghs)^{0.5} \quad (2\text{-}24)$$

$$N = 1.0 - 0.56 \log D_* \quad (2\text{-}25)$$

$$A = 0.14 + \frac{0.23}{D_*^{0.5}} \quad (2\text{-}26)$$

$$M = 1.34 + \frac{9.66}{D_*} \quad (2\text{-}27)$$

$$F_{gr} = \frac{U_*^n \ (U_*')^{1-n}}{(\Delta g D)^{0.5}} \quad (2\text{-}28)$$

$$F_{ga} = \frac{F_{gr}}{A} \quad (2\text{-}29)$$

ถ้า $F_{ga} < 1$ แล้ว $F_{ga} = 1$

$$\Psi = C \left[\frac{F_{gr}}{A} - 1\right]^m \quad (2\text{-}30)$$

$$q_{*v} = B\Psi \left[D^{3/2} (g\Delta)^{1/2}\right] \quad (2\text{-}31)$$

$$q_b = 86400 \ \rho_s \ q_{*v} \quad (2\text{-}32)$$

2.4.4. สมการ Van Rijn ($0.04 < D_{50} < 5$ mm)

$$\Delta = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w \quad (2\text{-}33)$$

$$D_* = 10 * D_{50} \left[\frac{\Delta g}{\nu^2}\right]^{1/3} \quad (2\text{-}34)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018512

$D_* < 4$ $U_{*,cr}$ critecal bed shear velocity

$$U_{*,cr} = \frac{0.24}{D_*} \quad (2\text{-}35)$$

$$4 < D_* < 10 \quad U_{*,cr} = \frac{0.14}{D_*^{0.64}} \quad (2\text{-}36)$$

$$10 < D_* < 20 \quad U_{*,cr} = \frac{0.04}{D_*^{0.10}} \quad (2\text{-}37)$$

$$20 < D_* < 150 \quad U_{*,cr} = 0.013 * D_*^{0.20} \quad (2\text{-}38)$$

$$D_* > 150 \quad U_{*,cr} = 0.055 \quad (2\text{-}39)$$

$$U_{*,cr} = \frac{U_{*,cr} \Delta g D_{50}}{1000} \quad (2\text{-}40)$$

$$R = \left[\frac{Bh}{B + 2h}\right] \quad (2\text{-}41)$$

$$C' = 18 \log\left[\frac{(4000R)}{D_{90}}\right] \quad (2\text{-}42)$$

$$U_* = \frac{g^{0.5}\overline{U}}{C'} \qquad U = \text{Average Velocity} \quad (2\text{-}43)$$

$$T = \frac{(U_*)^2 - U_{*,cr}}{U_{*,cr}} \quad (2\text{-}44)$$

ถ้า $T < 0$ $T = 0$

$$q_{sv} = \frac{0.53\ T^{2.1}\ B(\Delta g)^{0.5}\ D_{50}^{1.5}}{D_*^{0.3}\ 1000} \quad (2\text{-}45)$$

$$q_b = 86400\ \rho_s\ q_{sv} \quad (2\text{-}46)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย