

บทที่ 10

(The Winds)

- 10.1 กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
- 10.2 แรงต่าง ๆ ที่ทำให้อากาศเคลื่อนที่
 - 10.2.1 แรง 1 : น้ำหนัก
 - 10.2.2 แรง 2 : แรงความชันของความกด
(Pressure Gradient Force)
 - 10.2.2.1 การคำนวณหาสูตรความเร่งอันเกิดจากแรงความชันของความกด
 - 10.2.3 แรง 3 : แรงโครีโอลิส (Coriolis Force)
 - 10.2.3.1 การคำนวณหาสูตรแรงโครีโอลิส
 - 10.2.4 แรง 4 : แรงเสียดทาน (Friction)
- 10.3 การรวมแรงเข้าด้วยกัน (Combination of the Forces)
 - 10.3.1 ลมจีโอสโทรฟิก (Geostrophic Wind)
 - 10.3.2 ลมเกรเดียน (Gradient Wind)
 - 10.3.3 ลมพื้นผิว (Surface Wind)
 - 10.3.4 ความสมดุลอุทกสถิต (Hydrostatic Equilibrium)
- 10.4 ความต่อเนื่องของลม (Continuity of Wind)
- 10.5 การวัดลม
 - 10.5.1 ทิศทางลม
 - 10.5.2 ความเร็วลม

ระบบลมฟ้าอากาศบางระบบจะทำให้อากาศแจ่มใส ลมสงบ และมีน้ำค้างเกิดขึ้นในตอนเช้า ในขณะที่อีกระบบหนึ่งทำให้เกิดเมฆมีฝนตกและลมพัดแรง และในบางระบบจะอยู่นานและแผ่ออกนับเป็นพันตารางกิโลเมตร ในขณะที่อีกระบบหนึ่งจะมีอายุสั้นและมีบริเวณแคบ ความแตกต่างในระบบลมฟ้าอากาศจะนำมาซึ่งความแตกต่างในชนิดของลมฟ้าอากาศ และชนิดเหล่านี้ขึ้นกับการหมุนเวียนของอากาศหรือลมนั่นเอง

การแยกแยะส่วนประกอบของลมในแนวนอน (ทิศตะวันออก-ทิศตะวันตก และทิศเหนือ-ทิศใต้) และส่วนประกอบของอากาศในแนวตั้งนับว่ามีประโยชน์ แม้ว่าการเคลื่อนไหวของลมแนวนอนโดยปกติจะแรงกว่าการเคลื่อนไหวของอากาศในแนวตั้งก็ตาม แต่การไหลในแนวตั้งจะมีความสำคัญทำให้เกิดเมฆและฝน ซึ่งเราจะเห็นต่อไปว่าการเคลื่อนที่ของอากาศในแนวตั้งจะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของอากาศในแนวนอน

ในบทนี้ เราจะแยกแยะแรงต่าง ๆ และการรวมกันของแรงที่ทำให้เกิดลม รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนไหวในแนวนอน และการเคลื่อนไหวในแนวตั้งของอากาศ

10.1 กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

กฎข้อที่ 1 : ถ้าไม่มีแรงมากระทำต่อวัตถุ วัตถุนั้นจะยังคงเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (อัตราเร็วและทิศทาง) เหมือนเดิมกับที่มันเคลื่อนที่มาก่อน

โดยความจริงแล้ว วัตถุทุกชนิดจะเกิดการต่อต้าน (offers resistance) เมื่อมีใครพยายามมาเปลี่ยนแปลงทั้งทิศทางหรืออัตราเร็วของการเคลื่อนที่ ความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่าแรงเฉื่อย (inertia)

กฎข้อที่ 3 : เมื่อวัตถุหนึ่งมีแรงไปกระทำต่อวัตถุที่สอง วัตถุที่สองจะส่งแรงสะท้อนกลับมายังวัตถุที่หนึ่งด้วยขนาดที่เท่ากัน แต่มีทิศทางตรงกันข้าม

นี่คือกฎที่อธิบายว่าทำไมจรวดจึงถูกบังคับให้พุ่งไปข้างหน้าในขณะที่เชื้อเพลิงถูกบังคับให้ออกมาทางข้างหลัง

กฎข้อที่ 2 : แรงที่กระทำบนวัตถุมีค่าเท่ากับมวลของวัตถุคูณด้วยความเร่งที่เกิดขึ้น ซึ่งเขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$F = ma$$

เมื่อ F คือแรง m คือมวลของวัตถุ และ a คือความเร่ง

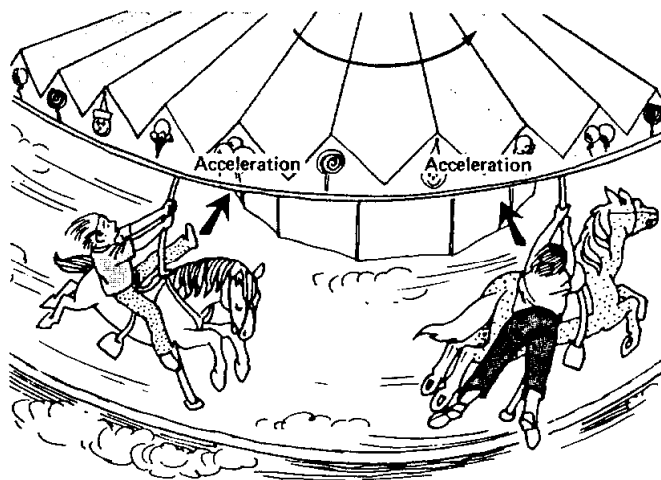
เพื่อที่จะเข้าใจถึงกฎอันนี้ เราต้องทำความเข้าใจความหมายของคำสามคำคือ ความหมายของคำว่า แรง (force) ซึ่งหมายถึงสิ่งที่เกี่ยวข้องกับการผลัก การดึง การยืดของสปริง และแรงเสียดทาน แรงเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการสัมผัส นอกจากนี้ยังมีแรงที่ไม่ได้เกิดจาก

การสัมผัส เช่นการดึงดูดของแรงโน้มถ่วง (gravitational attraction) แรงดึงดูดของไฟฟ้า (electrical attraction) และการผลักกันของไฟฟ้า (repulsion)

ตัวอย่างของความเร่งที่เราเข้าใจดีก็คือเมื่อรถยนต์เร่งความเร็วขึ้น หรือเมื่อเครื่องบินเริ่มบินขึ้นมันจะต้องเร่งไปตามทางวิ่งของสนามบินจนกระทั่งถึงความเร็วจุดหนึ่งเครื่องบินจึงจะบินขึ้นได้ ในขณะที่เครื่องบินหรือรถยนต์กำลังเร่งขึ้นเราจะรู้สึกว่ามันถูกผลักไปด้านหลังของที่นั่ง ความรู้สึกนี้เกี่ยวข้องกับแรงเฉื่อยของตัวเอง และแสดงว่าเราต้องถูกบังคับเพื่อให้เกิดการเร่ง และยังถูกทำให้เกิดการเร่งรวดเร็วขึ้นมากเท่าไร เรายังรู้สึกถูกผลักไปด้านหลังมากขึ้นเท่านั้น

ความเร่งอาจทำให้เกิดความสับสน เช่น การทดลองในเรื่องความเร่งต่อกับนิยามเวลาที่เข้าไปในเครื่องหมุนเหวี่ยงขนาดใหญ่ (centrifuge) ซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่ สิ่งนี้อาจทำให้เราประหลาดใจว่าความเร่งเกิดได้อย่างไร เมื่ออัตราเร็วของวัตถุยังคงที่

คำตอบก็คือ ความเร่งไม่ได้เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วเพียงอย่างเดียว แต่มันยังเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทิศทางด้วย วัตถุที่เคลื่อนที่ในวงกลม หรือในทางโค้งจะเปลี่ยนแปลงทิศทางและทำให้เกิดความเร่งขึ้น สำหรับความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (centripetal acceleration) จะเท่ากับความเร่งที่ออกจากศูนย์กลาง (centrifugal force) ความเร่งนี้เราจะรู้สึกได้เมื่อรถยนต์ทำการเลี้ยว หรือเมื่อเรานั่งม้าหมุนในส่วนสูงๆ (ดูรูป 10.1) เราจะรู้สึกว่าถูกบังคับไปในทิศทางตรงข้ามกับรถยนต์ หรือม้าหมุน



รูป 10.1 คนที่อยู่นั่งม้าหมุนที่กำลังหมุนจะรู้สึกพุ่งออกข้างนอกเนื่องจากแรงสู่ศูนย์กลางที่เข้าสู่ภายใน

คำจำกัดความ : ความเร่งคืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเมื่อเทียบกับเวลาดังนั้นเราเขียนได้ว่า

$$a = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงความเร็ว}}{\text{ระยะเวลา}}$$

ส่วนคำจำกัดความของความเร็วก็คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง เมื่อเทียบกับเวลา เขียนได้ว่า

$$v = \frac{\text{การเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง}}{\text{ระยะเวลา}}$$

ความเร็ว (velocity) เกี่ยวข้องทั้งทิศทางและอัตราเร็ว (speed) เช่นเราบอกว่านักวิ่งวิ่งด้วยความเร็ว 10 m/s ไปทางทิศเหนือ เป็นต้น

ความเร่งที่เราพบมากที่สุด คือ ความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก วัตถุใด ๆ ที่ตกลงมาจะเร็วขึ้น และเร็วยิ่งขึ้นตามเวลา ใกล้ระดับน้ำทะเลค่าความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงจะมีค่าคงที่และจะมีค่าเท่ากัน ไม่ว่าจะเป็นวัตถุใด ๆ ก้อนใหญ่หรือก้อนเล็ก น้ำหนักมากหรือน้ำหนักน้อย และมีค่าประมาณ 10 เมตรต่อ(วินาที)² (ค่าที่แท้จริงคือ 9.8 เมตรต่อ(วินาที)²) อักษรย่อที่ใช้คือ $g = 10 \text{ m/s}^2$ ซึ่งความหมายก็คือหลังจากแต่ละหนึ่งวินาทีที่วัตถุตกลงมาอย่างอิสระและไม่มียผลที่เกิดจากความต้านทานของอากาศจะตกลงมาเร็วเพิ่มขึ้น 10 m/s

ตัวอย่างที่ 10.1

คิงคองตัวหนึ่งตกจากยอดตึกซึ่งสูง 411 เมตร จงแสดงค่าความเร็วและความเร่งของคิงคองที่ตกในแต่ละวินาที

วิธีทำ : สิ่งที่เป็นประโยชน์ก็คือตารางการตกของคิงคอง เมื่อเริ่มต้นครั้งแรกก่อนที่คิงคองจะตกลงมา ความเร็วของมันเป็นศูนย์ ($t = 0$) แต่หลังจากหนึ่งวินาทีผ่านไป $t = 1$ คิงคองจะตกลงมาด้วยความเร็วสู่เบื้องล่างด้วยความเร็ว 10 m/s ดังนั้นในระหว่างวินาทีที่ 1 มันจะมีอัตราเร็วของการตกเฉลี่ยระหว่าง 0 และ 10 m/s หรือเท่ากับ 5 m/s นั่นเอง ดังนั้นในวินาทีแรกคิงคองจะตกลงมา 5 m ซึ่งเราทำเป็นตารางได้ดังนี้ (ดูรูป 10.3)

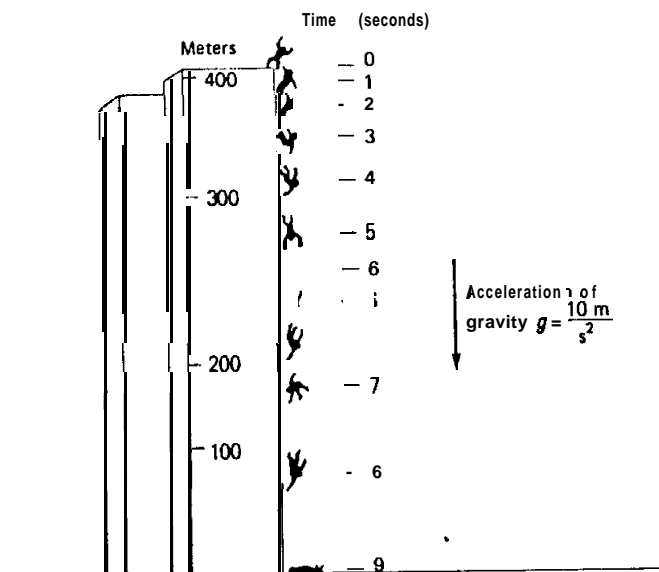
t	v	ระยะที่ตกในแต่ละวินาที	ระยะทางทั้งหมดจากจุดเริ่มต้น
0	0	0	0
1	10	5	5

สำหรับเมื่อ $t = 2$ วินาที คิงคองจะตกลงมาด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น 10 m/s กลายเป็น 20 m/s ในระหว่างวินาทีที่ 2 นี้ ความเร็วเฉลี่ยมีค่า 15 m/s ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ย 10 m/s

และ 20 m/s ดังนั้นคิงคองจะตกลงมาอีก 15 m จากเดิมกลายเป็นระยะทางทั้งหมด 20 m ดังนั้นเราสามารถ ทหารางต่อไปได้ดังนี้ (ดูรูป 10.2)

2	20	15	20
3	30	25	45
4	40	35	80
5	50	45	125
6	60	55	180
7	70	65	245
8	80	75	320
9	90	85	405

เนื่องจากตึกสูง 411 m จึงเป็นที่แน่นอนว่าคิงคองจะตกถึงพื้นดินหลังวินาทีที่ 9 เพียงเล็กน้อย และจะมีความเร็วมากกว่า 90 m/s (ตัวอย่างนี้ไม่คิดความต้านทานของอากาศ)



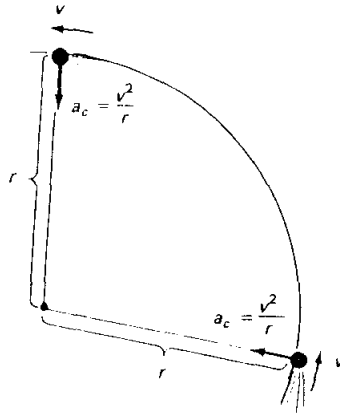
รูป 10.2 คิงคองตกจากยอดตึกจะลงมาด้วยความเร่ง (ในรูปนี้ไม่คิดความต้านทานของอากาศ)

ตัวอย่างต่อไปนี้จะเกี่ยวข้องกับความเร็วศูนย์กลางซึ่งมีความสำคัญในทางอุตุนิยมวิทยา เนื่องจากในหลาย ๆ สถานการณ์อากาศจะเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง เช่น ในบริเวณความกดสูงและบริเวณความกดต่ำ ในพายุไต้ฝุ่น ในพายุทอร์นาโดและในลมกรดที่พัดคดเคี้ยว โดยความจริงแล้ว แม้แต่วัตถุที่ปรากฏว่าเดินทางเป็นเส้นตรงบนพื้นโลกนั้นแท้จริงแล้วก็ยังมีการเปลี่ยนทิศทางเพราะ (1) ความโค้งของผิวโลก (2) การหมุนของโลกรอบตัวเอง (rotation) ซึ่งเราจะเห็นว่าสิ่งเหล่านี้สัมพันธ์กับแรง โคลิฮอลิส

ความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลาง (centripetal acceleration) ซึ่งมีตัวย่อว่า a_c จะมีสูตรดังนี้

$$a_c = \frac{v^2}{r}$$

เมื่อ v เป็นความเร็ว และ r เป็นรัศมีของวงกลม (ดูรูป 10.3)



รูป 10.3 แรงเข้าสู่ศูนย์กลางของลูกบอลที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมจะมีทิศเข้าสู่ศูนย์กลางของวงกลม และมีสูตรว่า $a_c = \frac{v^2}{r}$

ตัวอย่างที่ 10.2

นักบินอวกาศที่อยู่ในเครื่องหมุนเหวี่ยงขนาดใหญ่มุ่งหน้าด้วยความเร็ว 30 m/s รอบวงกลมที่มีรัศมี 9 m จงหาความเร่งและเปรียบเทียบความเร่งนี้กับความเร่งของโลก

วิธีทำ :

จากสมการ $a_c = \frac{v^2}{r}$

แทนค่า $a_c = \frac{(30 \text{ m/s})^2}{9\text{m}} = 100 \text{ m/s}^2$

คำตอบที่ได้เป็นความเร่งที่มากกว่าความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลกถึง 10 เท่า ซึ่งหมายความว่านักบินอวกาศมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเป็น 10 เท่า

ตัวอย่างที่ 10.3

จงหาความเร่งสู่ศูนย์กลางในพายุทอร์นาโดที่เกิดขึ้นทั่วไป และในบริเวณความกดต่ำ

ข้อมูล : ในพายุทอร์นาโด ปกติ $v = 50 \text{ m/s}$ และ $r = 200 \text{ m}$

$$\text{จากสมการ : } a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{(50 \text{ m/s})^2}{200\text{m}} = 12.5 \text{ m/s}^2$$

คำตอบที่ได้มีค่ามากกว่าความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกมาก ดังนั้นจึงไม่เป็นที่ประหลาดว่าพายุทอร์นาโดสามารถยกบ้านทิ้งหลังได้

ข้อมูลสำหรับในบริเวณความกดต่ำ ก็คือ $v = 10 \text{ m/s}$ และ $r = 500,000 \text{ m}$

$$\text{ดังนั้น } a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{(10 \text{ m/s})^2}{500,000\text{m}} = 0.0002 \text{ m/s}^2$$

ค่าที่ได้้น้อยกว่าค่าความเร่งของโลก แต่ก็มีความสำคัญอย่างยิ่งในการพยากรณ์อากาศต่อไปเราจะให้คำจำกัดความของคำว่า มวล (mass) มวลก็คือ จำนวนเนื้อ (material) ของวัตถุ หรือในทางเทคนิคก็คือจำนวนของความเฉื่อย (inertia) ที่วัตถุมีอยู่ ยกตัวอย่าง เช่น เรือขนาดใหญ่ที่ลอยอย่างช้า ๆ สามารถชนท่าเรือให้เอียงได้เนื่องจากมีมวลจำนวนมากของมันเอง

สิ่งที่ต้องระวังก็คือ มวล ไม่ใช่สิ่งเดียวกับน้ำหนัก วัตถุในอวกาศอาจไม่มีน้ำหนักเลย แต่ก็ยังคงมีมวลอย่างเดียวกันกับที่เมื่อมันอยู่บนพื้นโลก แม้แต่ในอวกาศซึ่งวัตถุไม่มีน้ำหนักแต่มันก็ยังแสดงความต่อต้าน (resistance) อันเดิมต่อการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในการเคลื่อนที่

น้ำหนักของวัตถุมีค่าเท่ากับแรงของความโน้มถ่วงที่มันบนวัตถุนั้น ดังนั้นน้ำหนัก (w) ก็คือแรงนั่นเองซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของนิวตันเช่นกัน w หรือน้ำหนักมีสูตร

$$w = mg$$

เมื่อ m เป็นมวล และ g คือ ความเร่งของโลก

ถ้าค่าของมวลเป็นกิโลกรัม g มีหน่วยเป็นเมตรต่อ (วินาที)² หน่วยของน้ำหนักจะเป็นนิวตัน ที่ระดับน้ำทะเลมวลหนึ่งกิโลกรัมหนัก 10 นิวตัน แต่บนดวงจันทร์หนึ่งกิโลกรัมเดียวกันนี้หนักเพียง 1.8 นิวตันเท่านั้น และบนดวงอาทิตย์จะหนัก 145.5 นิวตัน

ถ้าค่าของมวลมีหน่วยเป็นกรัม และ g มีหน่วยเป็น cm/s^2 น้ำหนักหรือแรงก็จะมีหน่วยเป็น dyne

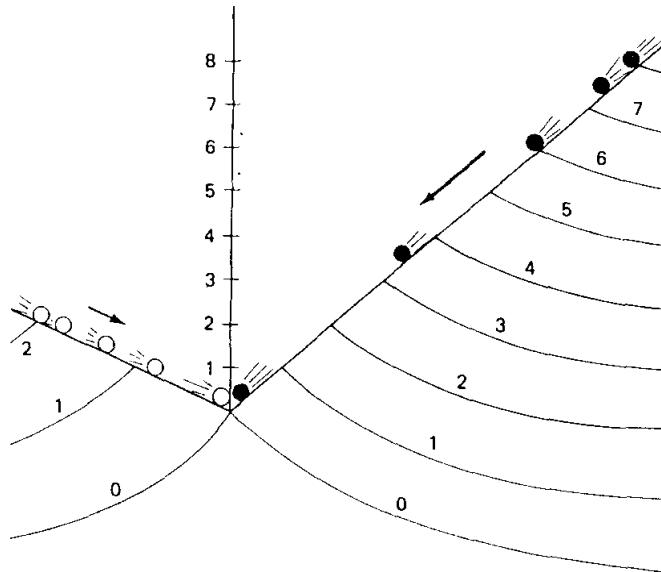
10.2 แรงต่าง ๆ ที่ทำให้อากาศเคลื่อนที่ (The Forces that Move Airs)

มีแรงที่แตกต่างกันอยู่หลายชนิดที่ทำให้อากาศเคลื่อนที่ ซึ่งเช่นเดียวกับความเร็วแรง แต่ละชนิดก็ไม่ได้มีแต่ขนาด (magnitude) เพียงอย่างเดียว แต่มีทั้งทิศทางด้วย

น้ำหนักก็คือแรงที่กระทำลงสู่เบื้องล่าง (ไปยังใจกลางโลก) ส่วนแรงที่เกิดจากความชันของความกด (pressure gradient force) จะบังคับให้อากาศจากบริเวณความกดสูงเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความกดต่ำกว่าและเมื่ออากาศเริ่มต้นเคลื่อนที่ มันจะถูกบังคับให้เฉไปทางขวามือในซีกโลกทางเหนือ และเฉไปทางซ้ายมือในซีกโลกทางใต้ด้วยอิทธิพลของการหมุนของโลก ค่าของแรงนี้เรียกว่า แรงโคริโอลิส และอากาศที่เคลื่อนที่นี้จะถูกทำให้ช้าลงด้วยแรงเสียดทาน (frictional force) แรงหลายชนิดที่กล่าวมานี้อาจจะจะเป็นแรงทั้งหมดที่กระทำต่ออากาศ

10.2.1 แรง 1 : น้ำหนัก

เป็นแรงที่กระทำลงสู่เบื้องล่างเสมอ และโดยตัวมันเองจะทำให้เกิดความเร่งที่มีค่าเท่ากับ g (10 m/s^2)



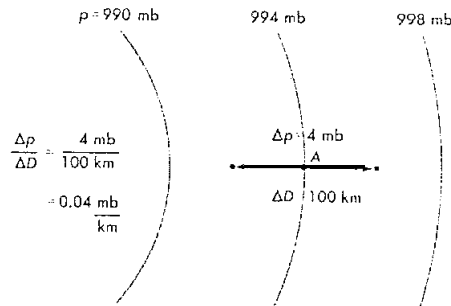
รูป 10.4 ความชันของความกดยังมีมาก ความเร่งก็ยังมีมากขึ้น ตำแหน่งของลูกบอลที่ลดหลั่นลงมาในแต่ละเวลาจะแสดงให้เห็นในแต่ละความชัน (slope) ข้อสังเกต : ความชันยังมีมากเส้นคอนทัวร์บนภูเขา (นั่นคือเส้นไอโซบาร์) ยิ่งอยู่ชิดกัน

10.2.2 แรงแรง 2 : แรงแรงความชันของความกด (pressure gradient force)

เมื่อเราเข้าเขตไซโคลหรือเขตเขมแปรญ ความกดจะเกิดขึ้นภายในเขตและเมื่อเปิดเขตออกของเหลวภายในเขตก็就会被บังคับให้ไหลออกมาสู่อากาศข้างนอกซึ่งมีความกดน้อยกว่า แรงที่เกิดจากความแตกต่างในความกดดันนี้ก็คือ แรงแรงความชันของความกดนั่นเอง

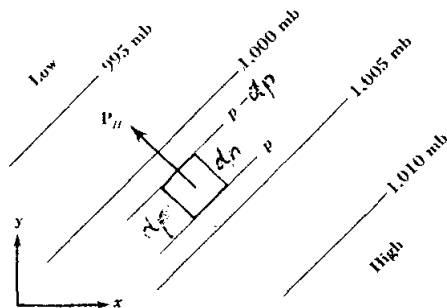
มีองค์ประกอบอย่างหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในแรงนี้คือ วัตถุที่ตกลงมาในเนินเขาที่สูงชันจะมีอัตราเร่งที่มากกว่าวัตถุที่ตกลงมาในเนินเขาที่ลาดชันน้อยกว่า ซึ่งหลักความจริงนี้ก็นำมาใช้กับแรงแรงความชันของความกดเช่นกัน ถ้าความแตกต่างในความกดจากสถานที่หนึ่งไปยังอีกสถานที่หนึ่งมีมาก (นั่นคือ มีความชันมาก) ความเร่งที่เกิดก็จะมากเช่นเดียวกัน **รูป 10.4**

ค่าความชันของความกดดันสามารถแสดงได้ด้วยเส้นไอโซบาร์ ในระหว่างเส้นไอโซบาร์สองเส้นจะมีความแตกต่างในความกดที่คงที่ (fix) ดังนั้นเส้นไอโซบาร์ยิ่งอยู่ชิดกันความชันของความกดก็ยิ่งมาก การเขียนเส้นไอโซบาร์มีประโยชน์ เพราะ (1) ลมจะพัดเกือบขนานกับเส้นไอโซบาร์ (2) เส้นไอโซบาร์ยิ่งอยู่ชิดกันลมยิ่งพัดแรง (โดยปกติแรงแรงความชันของความกดจะตั้งฉากกับเส้นไอโซบาร์เสมอ และมีทิศจากความกดสูงไปสู่ความกดต่ำ **รูป 10.5**)



รูป 10.5 ความชันของความกด (pressure gradient) ก็คือการเปลี่ยนแปลงความกดต่อระยะทางซึ่งตั้งฉากกับเส้นไอโซบาร์ ในรูปความชัน (gradient) ที่จุด A ก็คือ (996-992) มิลลิบาร์หารด้วย 100 กิโลเมตร หรือเท่ากับ 0.04 มิลลิบาร์ต่อกิโลเมตร

10.2.2.1 การคำนวณหาสูตรความเร่งอันเกิดจากแรงความชันของความกด เพื่อแสดงถึงแรงที่เกิดจากความแตกต่างของความกดตันในแนวนอน (จากรูปที่ 10.6)



รูป 10.6 ความสัมพันธ์ของแรงความชันของความกดกับเส้น ไอโซบาร์

สมมติว่าอากาศปริมาตรรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์มีฐานตั้งอยู่บนระนาบ และมีพื้นที่ภาคตัด

ขวาง = A ความยาวในแนวนอน = dn

เพราะฉะนั้นปริมาตร (V) = Adn

และมวล (M) = ρAdn (เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของอากาศ)

ให้ด้านหน้าของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ มีความกด = p

และพื้นที่ด้านหลังของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ก็มีความกดน้อยกว่า dp เหลือเท่ากับ p-dp

$$\text{เนื่องจาก } dp = \frac{F}{A}$$

ดังนั้นแรงที่กระทำต่ออากาศรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ก็คือ

$$F = dpA$$

ถ้าหารด้วยมวล ρAdn ตลอดก็จะได้แรงต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักดังนี้

$$F = \frac{dpA}{\rho Adn}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } F = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dn}$$

$$\text{จากสมการ } F = ma$$

$$\text{ถ้า } m = 1$$

$$F = a$$

เพราะฉะนั้นสมการจะเปลี่ยนเป็น

$$a_{p.G} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dn}$$

เมื่อความหนาแน่นของอากาศ (ρ) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความแตกต่างในความกด (dp) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร และความแตกต่างในระยะทาง (dn) มีหน่วยเป็นเมตร เนื่องจากความกดมักแสดงด้วยหน่วยมิลลิบาร์ ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนเป็นนิวตันต่อตารางเมตรเสียก่อนจึงจะแทนลงในสูตรได้

ตัวอย่างที่ 10.4

ความกดที่ต่างกัน 10 mb จะเท่ากับจำนวนกี่นิวตันต่อตารางเมตร จงบอกชื่อเรียกทั่วไปของหน่วยนิวตันต่อตารางเมตร

วิธีทำ :

หน่วยนิวตันต่อตารางเมตร มีชื่อเรียกทั่วไปว่า พาสคาล (pascal) โดยการคูณค่ามิลลิบาร์ด้วย 100 ก็จะได้จำนวนของพาสคาล ดังนั้น 10 มิลลิบาร์จะเท่ากับ 1000 พาสคาล

ตัวอย่างที่ 10.5

ในพายุใต้ฝุ่นความแตกต่างในความกดระหว่างเมืองสองเมืองเท่ากับ 10 mb และสองเมืองนี้อยู่ห่างกัน 100 กิโลเมตร โดยการกำหนดค่าความหนาแน่นของอากาศ (ρ) = 1.2 kg/m^3 จงหาความเร่งอันเนื่องมาจากความชันของความกด ($a_{p.G}$)

$$\text{จากสูตร } a_{p.G} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dn}$$

$$\text{เนื่องจากความกด } 1 \text{ mb} = 100 \text{ N/m}^2$$

$$\text{เพราะฉะนั้นความกด } 10 \text{ mb} = 1000 \text{ N/m}^2$$

$$\text{และระยะทาง } 100 \text{ km} = 100,000 \text{ m}$$

วิธีทำ :

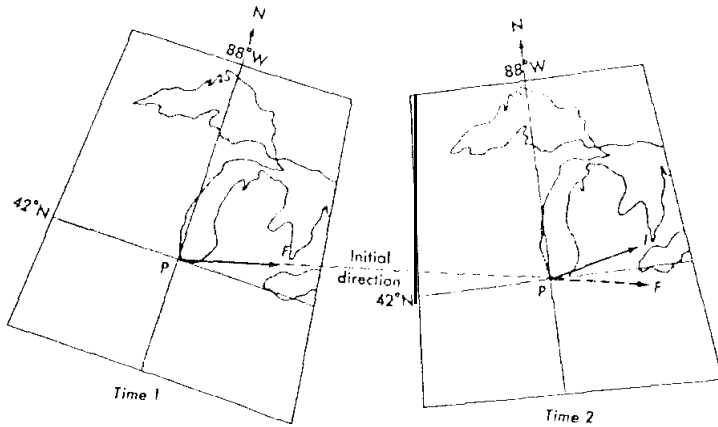
$$a_{p.G} = \left(\frac{1}{1.2 \text{ kg/m}^3} \right) \left(\frac{1000 \text{ N/m}^2}{100,000 \text{ m}} \right) = 0.83 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

ค่าที่คำนวณได้นั้นน้อยกว่าความเร่งอันเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมาก

10.2.3 แรง 3 : แรงโคริโอลิส (Coriolis Force)

ถ้าหากโลกไม่หมุนรอบตัวเอง ลมจะพัดตามทิศทางของแรงความชันของความกด (Pressure gradient force) แต่เนื่องจากการหมุนของโลก จะทำให้เกิดแรงใหม่ขึ้นมาอีกแรงหนึ่งคือ แรงโคริโอลิส หรือแรงเฉ (deflecting force)

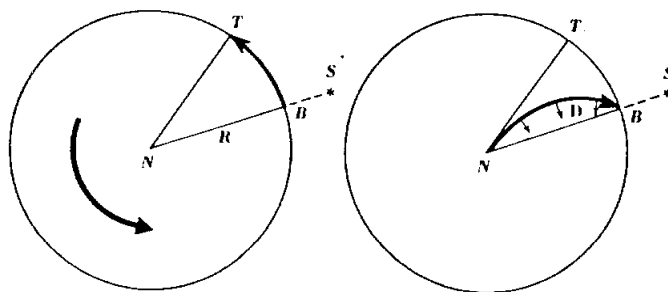
จากรูป 10.7 เป็นการแสดงถึงแรง โครีโอลิสที่กระทำต่อจรวดที่ยิงออกจากจุด P ที่ออกไปในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับผู้ที่สังเกตในอากาศจะเห็นจรวดเดินทางเป็นเส้นตรง P-F ส่วนบุคคลที่อยู่บนจุด P ซึ่งอยู่บนพื้นดินจะถูกพาไปตามการหมุนของโลก และในเวลาต่อมาซึ่งเป็นเวลาที่ 2 คนบนพื้นดินจะเห็นจรวดมีตำแหน่งอยู่ทางตะวันออกเฉียงเหนือของจุดเดิม สำหรับในเวลา 2 ของรูป 10.7 เส้น P-I ก็คือทิศทางเดิม (initial direction) ของจรวดเมื่อเกี่ยวข้องกับ (relate) กับพื้นโลก แต่จริง ๆ แล้วจรวดจะเคลื่อนที่ในทิศทาง P-F ทั้งนี้เป็นเพราะการหมุนรอบแกนของโลกนั่นเอง จรวดจะปรากฏให้ผู้สังเกตการณที่จุด P เห็นว่าได้เบี่ยงเบนไปทางขวามือของทิศทางเดิม ผลของการหมุนของโลกต่อลมก็จะเป็นเช่นเดียวกับจรวดที่ยิงออกไป สำหรับในซีกโลกทางเหนือ แรงโครีโอลิสทำให้ลมพัดเฉไปทางขวามือและในซีกโลกทางใต้จะเฉไปทางซ้ายมือ



รูป 10.7 จรวดที่ถูกยิงออกไปทางตะวันออกเฉียงเหนือจากจุด P จะปรากฏต่อผู้สังเกตการณที่จุด P ว่าถูกทำให้เบี่ยงเบนไปทางขวามืออันเนื่องมาจากแรงโครีโอลิส

10.2.3.1 การคำนวณหาสูตรแรงโครีโอลิส

สมมุติว่าเราขึ้นอยู่กับขั้วโลก N และยิงจรวดออกไปยังจุด B จรวดจะเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง NB ในขณะที่โลกกำลังหมุนไปด้วย เมื่อจรวดเดินทางไปได้ NB จุด B จะเลื่อนไปอยู่ที่จุด T ถ้ามองทางเดินของจรวดเมื่ออยู่ในอากาศจะเห็นเป็นเส้นตรง แต่ถ้ามองจากคนที่อยู่บนโลกที่กำลังหมุน จะเห็นว่าครั้งแรกจรวดจะเดินทางเป็นเส้นตรง และค่อย ๆ เบี่ยงไปทางขวามือในภายหลังการเบี่ยงไปทางขวามือของเส้นตรง NT เกิดจากความเร่ง a หรือถ้าเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยมวล เมื่อ $m = 1$ จากสมการ $F = ma$ ก็จะได้ $F = a$ ดังนั้น a ก็คือความเร่งที่เกิดจากแรงโครีโอลิส รูป 10.8



รูป 10.8 การเคลื่อนที่ของจรวดที่สัมพันธ์กับพื้นผิวของโลกที่เกิดขึ้นบนขั้วโลก ในขณะที่จรวดเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง จากจุด N ถึง B (รูปแผนภาพด้านซ้าย) เป้าหมาย T จะถูกหมุนเคลื่อนที่จากจุด B ไป T และทำให้เห็นเหมือนกับว่าจรวดได้มีการเบี่ยงเบนไปทางขวามือ ในกรณีที่จรวดถูกมองโดยผู้ที่สังเกตการณ์บนโลกที่กำลังเคลื่อนที่ (รูปแผนภาพทางขวามือ) เส้นทางของจรวดจะเป็นเส้นโค้งจากจุด N ถึง B

วิธีหาสูตร :

โลกหมุนด้วยความเร็ว 2π เรเดียนในหนึ่งวันของไซเดอเรียล เพราะฉะนั้น

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วเชิงมุม (w)} &= \frac{2\pi \text{ เรเดียน}}{23 \text{ ช.ม. } 56 \text{ วินาที } 4.09 \text{ วินาที}} \\ &= \frac{2\pi}{86164 \text{ วินาที}} \\ &= 7.29 \times 10^{-5} \text{ เรเดียนต่อวินาที} \end{aligned}$$

ถ้า r เป็นระยะทางจาก N ถึง B

v เป็นความเร็วของจรวด (ลม) จาก N ถึง B

$$\text{จะได้ว่า } r = vt \quad (10.1)$$

แต่เนื่องจากความเร็วเชิงมุมของโลก $w = \frac{c}{r}$ (เมื่อ c เป็นความเร็วตามเส้น)

$$\text{ดังนั้น } c = wr$$

$$\text{หรือ } \frac{\hat{s}}{t} = wr \quad (\text{เมื่อ } c = \frac{\hat{s}}{t} \text{ และ } \hat{s} = \text{เป็นระยะทางของเส้นโค้ง BT})$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } \hat{s} = wrt \quad (10.2)$$

แทนค่า $r = vt$

$$\hat{s} \approx wvt^2 \quad (10.3)$$

แต่ระยะทางที่โลกเคลื่อนที่ $\hat{s} = \frac{1}{2} at^2$ (เมื่อ $u = 0$) (10.4)

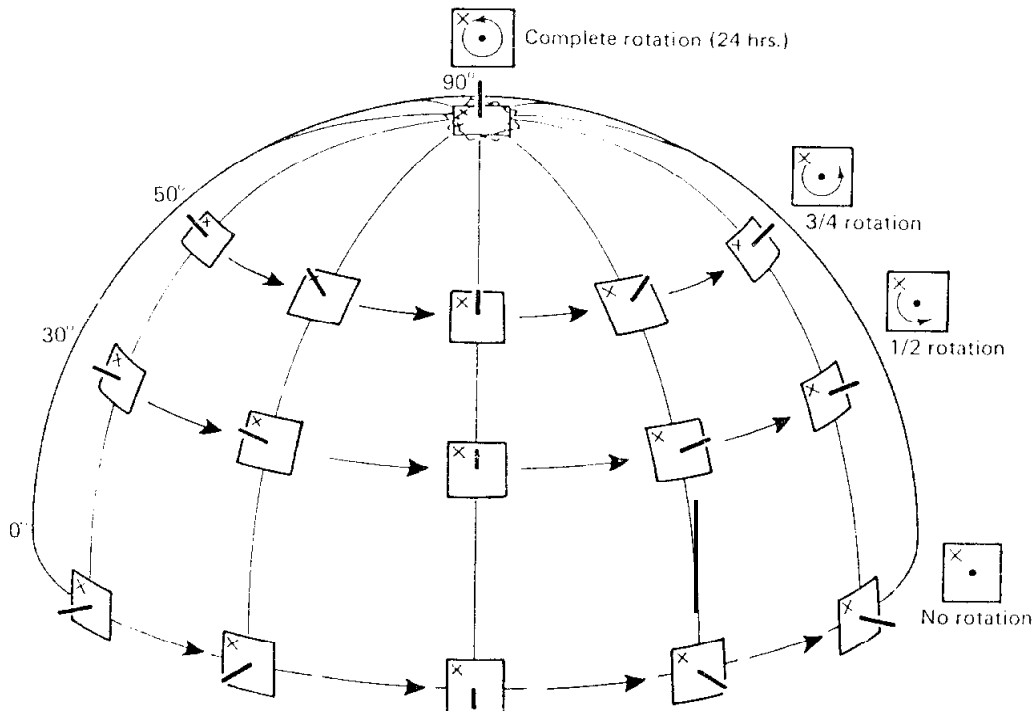
ดังนั้น $\frac{1}{2} at^2 = wvt^2$

หรือ $a = 2wv$ (10.5)

ถ้าเขียนเป็นสมการในรูปของแรงไคลิโวลิส ก็คือ

$$F = 2wv$$

ค่าแรงไคลิโวลิสนี้คำนวณมาจากที่ขั้วโลก ถ้าเป็นที่ละติจูดอื่นสมการก็จะเปลี่ยนแปลงไปอีก



รูป 10.9 การแสดงจำนวนการหมุนของพื้นผิว (amount of rotation) ในแนวราบรอบ ๆ แกนของเส้นตั้งฉากที่ละติจูดต่าง ๆ ในเวลา 24 ชั่วโมง ขนาด (magnitude) ของแรงไคลิโวลิสจะเป็นสัดส่วนกับจำนวนการหมุนที่มากหรือน้อยของพื้นผิว

จากรูปที่ 10.9 สำหรับที่ขั้วโลกนั้น พื้นผิวสี่เหลี่ยมของพื้นดินจะตั้งฉากกับแกนโลก การหมุนของโลกในแต่ละวันจะทำให้พื้นดินสี่เหลี่ยมนี้หมุนครบหนึ่งรอบพอดี ซึ่งหมายความว่า อากาศเบื้องบนที่มีลมพัดก็จะหมุนครบหนึ่งรอบด้วย ส่วนที่เส้นศูนย์สูตร พื้นดินสี่เหลี่ยมจะขนานกับแกนโลก ดังนั้นเมื่อโลกหมุนไปรอบแกน พื้นดินสี่เหลี่ยมที่ศูนย์สูตรก็จะไม่หมุนแต่อย่างใด ความแตกต่างที่มองเห็นได้ง่ายก็คือสมมติว่ามีเสาปักอยู่ที่ขั้วโลกเหนือ และอีกอันปักอยู่ที่เส้นศูนย์สูตร ในระหว่างการหมุนของโลกแต่ละวัน เสาที่ปักอยู่ที่ขั้วโลกจะหมุนรอบตัวเองครบหนึ่งรอบด้วย ในขณะที่เสาที่ศูนย์สูตรจะไม่หมุนแต่อย่างใด ดังนั้นเสาที่ปักอยู่ระหว่างเขตทั้งสองก็จะหมุนอยู่ระหว่างกึ่งกลางตั้งแต่มากจนถึงน้อย โดยลดจากละติจูดสูง ๆ ไปยังละติจูดต่ำ ๆ หรือเราพูดได้ว่า ที่ละติจูดสูง ๆ ค่าแรงโครีโอลิสจะมาก และที่ละติจูดต่ำ ๆ ค่าแรงโครีโอลิสจะน้อย และมีค่าเป็นศูนย์ที่เส้นศูนย์สูตร

จากรูปที่ 10.9 เราจะสามารถเขียนสูตรทั่วไปของแรงโครีโอลิสได้ว่า

$$F_c = 2wv \sin \phi \quad (10.6)$$

เมื่อ ϕ เป็นละติจูดที่ลมเกิดขึ้น

การที่สูตรเพิ่มค่า $\sin \phi$ ลงไปด้วยก็เพราะเมื่อ $\phi = 90^\circ$ $\sin 90^\circ$ จะเท่ากับ

1 หรือ $F = 2wv$ นั้นเอง และ ถ้า $\phi = 30^\circ$ $\sin 30^\circ$ จะเท่ากับ $\frac{1}{2}$ หรือ

$F = wv$ และ เมื่อ $\phi = 0$ (เส้นศูนย์สูตร), $\sin 0$ จะเท่ากับ 0 หรือ $F = 0$ นั้นเอง

เนื่องจากเป็นแรงต่อหนึ่งหน่วยมวล $F_c = a_c$ เราจึงเขียนได้ว่า

$$a_c = 2wv \sin \phi \quad (10.7)$$

สูตรนี้เราทำให้ง่ายขึ้นโดยการแทนค่า $2w$ ($w = 7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/sec}$) ลงในสมการ 10.7 จะได้สูตรอย่างง่ายดังนี้

$$a_c = (1.46)(10^{-4}) v \sin \phi \quad (10.8)$$

ตัวอย่างที่ 10.6

จงหาความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโครีโอลิสในพายุทอร์นาโดและในบริเวณความกดต่ำซึ่งเกิดขึ้นที่ละติจูด 43°

ข้อมูล : จากตัวอย่างที่ 10.3 ความเร็ว v สำหรับพายุทอร์นาโดมีค่า 50 m/s และในบริเวณความกดต่ำ $v = 10 \text{ m/s}$

วิธีทำ :

ในพายุทอร์นาโด

$$\begin{aligned} a_c &= (1.46)(10)^{-4} v \sin \phi \\ &= (1.46)(10)^{-4} (50 \text{ m/s}) \sin 43^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (1.46)(10)^{-4} (50\text{m/s})(0.682) \\
 &= (5)(10)^{-3} \text{ m/s}^2 \quad (\text{ค่าประมาณ})
 \end{aligned}$$

ค่านี้น้อยกว่าความเร่งสู่ศูนย์กลาง (centripetal acceleration) ในพายุทอร์นาโดเป็นอันมาก

สำหรับ ในบริเวณความกดต่ำ

$$\begin{aligned}
 a_c &= (1.46)(10)^{-4} (10\text{m/s}) \sin 43^\circ \\
 &= (1.46)(10)^{-4} (10\text{m/s})(0.682) \\
 &= 10^{-3} \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

ค่านี้น้อยกว่าความเร่งสู่ศูนย์กลาง ในบริเวณความกดต่ำ

ตัวอย่างข้างบนนี้แสดงถึงความจริงที่สำคัญมากสองประการ อันแรกคือความเร่งอันเกิดจากโครีโอลิสจะมีค่าน้อยกว่าความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วงเป็นอันมาก สิ่งนี้เองทำให้เราไม่รู้ถึงค่าอันนี้ ประการที่สองความเร่งอันเกิดจากโครีโอลิสไม่มีความสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับความเร่งสู่ศูนย์กลางในพายุทอร์นาโดเนื่องจากพายุทอร์นาโดมีเสกขนาดเล็ก ในการเคลื่อนที่ แต่กลับกันค่าความเร่งอันเกิดจากโครีโอลิสจะมีความสำคัญค่อนข้างมาก ในบริเวณความกดต่ำ เพราะอากาศที่ห่อหุ้มบริเวณความกดต่ำเป็นเสกขนาดใหญ่

10.2.4 แรง 4 : แรงเสียดทาน (Friction)

ค่าของแรงเสียดทานมักจะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ช้าลง ซึ่งค่านี้มีความยุ่งยากสำหรับในน้ำและอากาศมากกว่าในวัตถุที่เป็นของแข็ง ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะหาสูตรอย่างง่ายของความเร่งที่แรงเสียดทานทำให้เกิดขึ้น

โดยความจริงแล้ว แรงเสียดทานไม่ได้ทำให้อากาศพัดช้าลงเสมอไป และบางครั้งกลับเร่งให้เข้าเคลื่อนที่เร็วขึ้น เป็นที่เข้าใจว่ากระแสที่พื้นผิวมหาสมุทรของโลกถูกลากหรือทำให้เคลื่อนที่ไปด้วยแรงเสียดทานของลมที่พื้นผิวนั่นเอง

แรงเสียดทานจะทำให้ลมที่อยู่ใกล้กับพื้นดินพัดช้าลง ในกรณีเช่นนี้แรงเสียดทานจะอยู่ในทิศทางตรงกันข้ามลมที่พัด ค่าของแรงเสียดทานมีความสำคัญในการเคลื่อนที่ที่มีขนาดเล็ก เช่น ในลมหมุนเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นบนถนน และจะมีความสำคัญน้อยลงสำหรับการเคลื่อนที่ขนาดใหญ่ เช่น ในลมกรด ค่าแรงเสียดทานเมื่อขึ้นไปสูงจะลดน้อยลง และจะตัดทิ้งไปเมื่อสูงกว่า 1 กิโลเมตร อย่างไรก็ตามในการเคลื่อนที่ขนาดใหญ่เช่นลมที่ห่อหุ้มบริเวณความกดสูงและรอบบริเวณความกดต่ำค่าของแรงเสียดทานจะต้องนำมาคิดด้วยเมื่ออยู่ต่ำกว่าหนึ่งกิโลเมตร

จากที่กล่าวมาทั้งหมดเราสามารถสรุปเกี่ยวกับแรงต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ในแนวอน และการเคลื่อนที่ในแนวตั้งดังนี้

1. ค่าความชันของความกดในแนวอน ทำให้อากาศมีความเร่งจากความกดสูงสู่

ความกดต่ำ

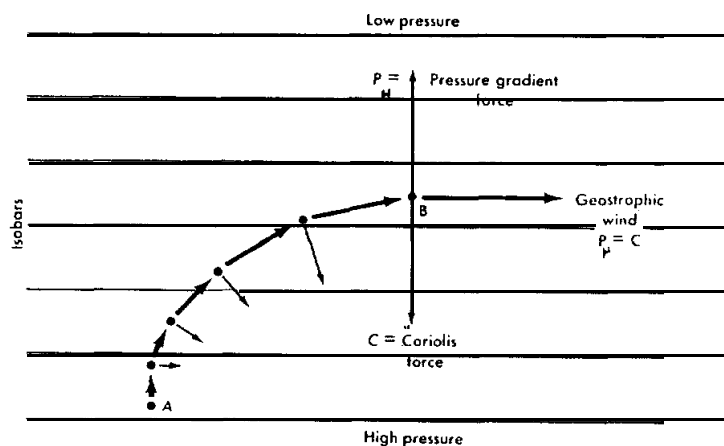
2. ความเร็วอื่นเนื่องจากแรงโน้มถ่วงทำให้อากาศมีความเร็วในแนวตั้ง
3. ในระบบลมขนาดใหญ่บนพื้นโลก ค่าของแรงโคริโอลิสจะทำให้ลมพัดเฉไปทางขวามือในซีกโลกทางเหนือ และเฉไปทางซ้ายมือในซีกโลกทางใต้
4. การเคลื่อนที่ในวงกลมจะมีอิทธิพลของแรงสู่ศูนย์กลางเข้ามาเกี่ยวข้อง
5. แรงเสียดทานทำให้ลมพัดช้าลง ซึ่งจะมีมากที่สุดที่พื้นดินและลดน้อยลงจนถึงความสูง 1 กิโลเมตร

10.3 การรวมแรงเข้าด้วยกัน (Combination of the Forces)

เมื่อมีแรงหลายชนิดมากกระทำต่อวัตถุก็จะต้องมีการรวมกันเพื่อจะได้แรงสัมพันธ์ทั้งหมด และในการรวมนี้จะต้องคำนึงถึงทิศทางของมันด้วย

10.3.1 ลมจีโอสโทรฟิก (Geostrophic Wind)

ลมจีโอสโทรฟิกเป็นลมที่ไม่มีความเร็วและเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในส่วนบนของบรรยากาศที่ปราศจากแรงเสียดทาน ลมนี้เป็นผลจากความสมดุลของแรงความชันของความกดกับแรงโคริโอลิส เมื่อมีแรงความชันของความกด (P_H) เกิดขึ้น ครั้งแรกก่อนอากาศจะมีความเร็วที่จะข้ามเส้นไอโซบาร์ได้โดยออกจากบริเวณความกดสูงสู่บริเวณความกดต่ำ (ดูรูป 10.10)



รูป 10.10 รูปภาพแสดงถึงก่อนอากาศซึ่งเดิมที่อยู่จุด A และมีแรงความชันของความกด (P_H) และแรงโคริโอลิส (C) มากกระทำที่จุดต่าง ๆ เมื่อความเร็วของลมเพิ่มขึ้นค่าของโคริโอลิสก็ยิ่งเพิ่มและที่จุด B $P_H = C$ ซึ่งทำให้ลมขนานกับเส้นไอโซบาร์ และเรียกว่า ลมจีโอสโทรฟิก (ลมที่ไม่มีแรงเสียดทาน)

และเมื่อก่อนอากาศเพิ่มความเร็วขึ้นค่าของแรงโคริโอลิส (C) ก็จะมีมากขึ้น ทำให้ก่อนอากาศค่อย ๆ เจไปทางขวามือ (ในซีกโลกทางเหนือ) ของทิศทางการเคลื่อนที่เดิม ในขั้นสุดท้ายค่าของแรงทั้งสองนี้จะสมดุลกันและจะได้ผลลัพธ์ของลมที่เรียกว่า จีโอสโทรฟิก ซึ่งจะพัดเป็นเส้นตรงด้วยความเร็วคงที่และขนานกับเส้นไอโซบาร์ เนื่องจากแรงโคริโอลิสเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบอากาศที่มีขนาดใหญ่บนพื้นโลก ดังนั้นลมจีโอสโทรฟิกก็เช่นเดียวกัน

เนื่องจากลมจีโอสโทรฟิกเกิดจากความสมดุลของแรงโคริโอลิส และแรงความชันของความกด ดังนั้นมีสูตรอย่างง่ายว่า

$$a_c = a_{P.G}$$

$$\text{หรือ } (1.46)(10)^{-4} \sin\phi (v) = \frac{1}{e} PG \quad (\text{เมื่อ } PG = \frac{dp}{dn})$$

เนื่องจากเราต้องการหาความเร็วของลม ดังนั้น

$$v_g = \frac{(6.85 \text{ s})(PG)(10)^3}{e \sin Q}$$

เมื่อ v_g คือลมจีโอสโทรฟิก (เดิมห้อยท้าย g ที่ v เพื่อจะแบ่งให้เห็นความแตกต่าง)

ตัวอย่างที่ 10.7

เมือง ก และเมือง ข ทั้งคู่อยู่ที่ละติจูด 43° มีระยะทางห่างกัน 100 กิโลเมตร และมีความแตกต่างในความกดตัน 10 mb ค่าความหนาแน่นของอากาศ $c = 1.2 \text{ Kg/m}^3$ จงคำนวณความเร็วของลมจีโอสโทรฟิก

$$\text{จากสูตร } v_g = \frac{(6.85 \text{ s})(PG)(10)^3}{e \sin Q}$$

วิธีทำ □

แทนค่า

$$v_g = \frac{(6.85 \text{ s}) \left(\frac{1000 \text{ N/m}^2}{100,000 \text{ m}} \right) (10)^3}{(1.2 \text{ Kg/m}^3) (0.682)}$$

$$\square (1.2 \text{ Kg/m}^3) (0.682)$$

$$\square 83.3 \text{ m/s}$$

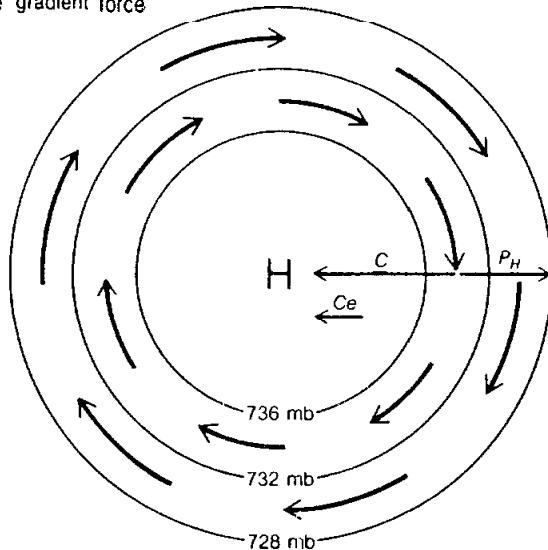
ลมจีโอสโทรฟิกที่คำนวณได้นี้มีค่ามากเกินไปจนความเป็นจริงในธรรมชาติ เพราะตามความจริงแล้วจะต้องมีอิทธิพลของแรงเสียดทานที่ทำให้ความเร็วของลมจีโอสโทรฟิกลดลง

10.3.2 ลมเกรเดียน (Gradient Wind)

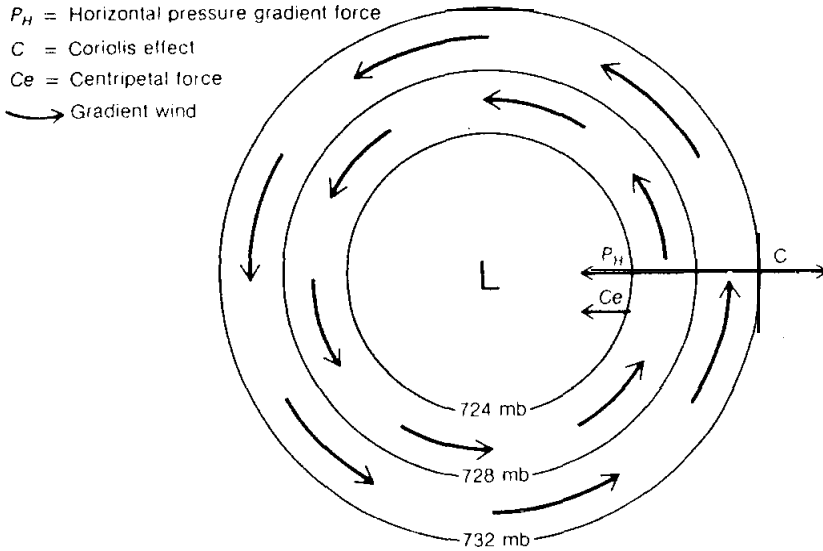
ลมเกรเดียนมีลักษณะบางอย่างเหมือนกับลมจีโอสโทรฟิกคือมีขนาดใหญ่ที่ปราศจากแรงเสียดทาน (อยู่เบื้องสูงของอากาศ) และขนานกับเส้นไอโซบาร์ ส่วนความแตกต่างที่สำคัญระหว่างสองลมนี้คือ ลมจีโอสโทรฟิกเดินทางเป็นเส้นตรง ในขณะที่ลมเกรเดียนเดินทางเป็นเส้นโค้ง เนื่องจากผลสุทธิของแรงสู่ศูนย์กลาง (net centrifugal force) บังคับให้ลมเดินทางเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นลมเกรเดียนจึงไม่ใช่ผลจากความสมดุลของแรง สำหรับแรงสู่ศูนย์กลางนั้นจะเปลี่ยนแปลงทิศทางของก้อนอากาศแต่ไม่ใช่อัตราเร็วของก้อนอากาศ ดังนั้น ในลมเกรเดียนจะมีแรง 3 แรงที่กระทำต่อกันคือ แรงสู่ศูนย์กลาง แรงโคริโอลิส และแรงความชันของความกด

ลมเกรเดียนจะเกิดขึ้นเหนือชั้นความเสียดทานรอบ ๆ บริเวณความกดสูงหรือรอบ ๆ บริเวณความกดต่ำ ในบริเวณความกดสูง เส้นไอโซบาร์จะมีลักษณะเป็นวง ๆ ล้อมรอบบริเวณความกดที่ต่ำมากที่สุด ซึ่งอยู่ตรงกลาง (ดูรูป 10) ค่าแรงความชันของความกด (P_H) มีทิศออกสู่ข้างนอกของศูนย์กลางความกดสูง ส่วนแรงโคริโอลิส (C) จะมีทิศเข้าสู่ภายใน ค่าของแรงโคริโอลิสจะมากกว่าแรงความชันของความกดเล็กน้อย ด้วยค่าที่แตกต่างกันระหว่างแรงทั้งสองนี้จะเท่ากับแรงสู่ศูนย์กลาง (C_e) ซึ่งมีทิศเข้าสู่ภายใน สำหรับซีกโลกทางเหนือ แรงโคริโอลิสจะอยู่ทางขวามือของแรงลัพธ์ที่เรียกว่าลมเกรเดียนเสมอ ดังนั้นลมนี้จะพัดขนานกับเส้นไอโซบาร์ และมีทิศตามเข็มนาฬิกา

- P_H = Horizontal pressure gradient force
- C = Coriolis effect
- C_e = Centripetal force
- ← Gradient wind



รูป 10.11 ในซีกโลกทางเหนือ บริเวณความกดสูงที่อยู่เหนือชั้นความเสียดทาน (Friction layer) ลมเกรเดียนจะพัดตามเข็มนาฬิกาและขนานกับเส้นไอโซบาร์



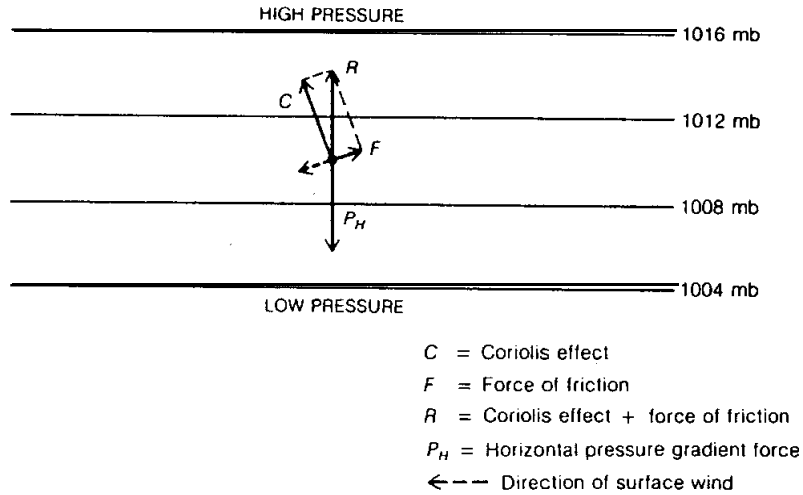
รูป 10.12 ในซีกโลกทางเหนือบริเวณความกดต่ำเหนือขั้วเสียดทาน ลมเกรเดียนจะพัดทวนเข็มนาฬิกา และขนานกับเส้นไอโซบาร์

ในบริเวณความกดต่ำเส้น ไอโซบาร์จะมีลักษณะเป็นวง ๆ ล้อมรอบบริเวณตรงกลางที่มีความกดต่ำที่สุด จากรูปที่ 10.12 แรงความชันของความกดจะมีทิศเข้าสู่ภายในไปยังศูนย์กลางความกดต่ำ และแรงโคริโอลิสจะมีทิศสู่ภายนอก สำหรับค่าของแรงโคริโอลิสจะน้อยกว่าค่าแรงความชันของความกดเล็กน้อย ด้วยค่าที่แตกต่างระหว่างแรงทั้งสองนี้ จะเท่ากับแรงสู่ศูนย์กลางซึ่งเข้าสู่ภายใน สำหรับในซีกโลกทางเหนือ บริเวณความกดต่ำที่อยู่เหนือขั้วเสียดทานลมเกรเดียนจะพัดทวนเข็มนาฬิกา และขนานกับเส้น ไอโซบาร์

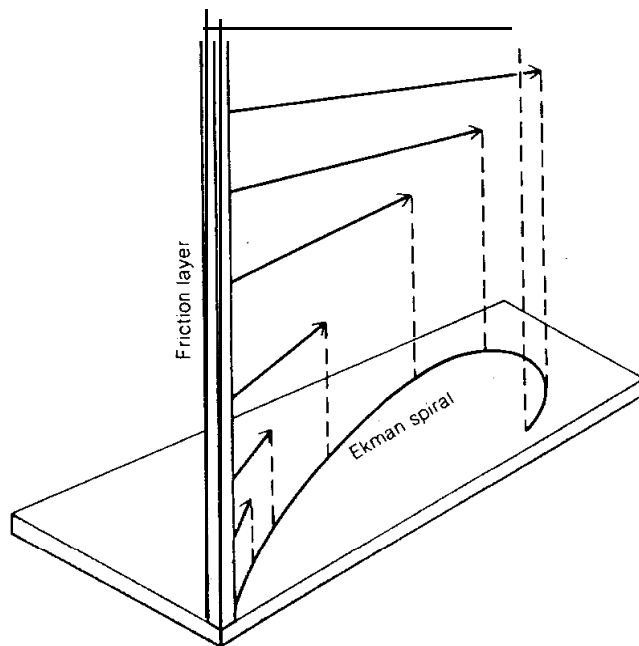
สำหรับสมการในการคำนวณนั้นหาได้ดังนี้ แรงทั้ง 3 แรง ซึ่งประกอบด้วยแรงความชันของความกด แรงโคริโอลิสและแรงสู่ศูนย์กลาง เมื่อรวมกันเข้าแล้วได้ค่าความเร่งเท่ากับศูนย์ นั่นคือ ความเร็วของลมเกรเดียนมีค่าคงที่

$$\frac{V^2}{r} + 2 \, wv \sin \phi - \frac{1}{c} \frac{dp}{dn} = 0 \quad \square \quad \square$$

ค่าของแรงสู่ศูนย์กลางนั้น เป็นแรงที่ทำให้ทิศทางของลมเปลี่ยนในขณะที่เคลื่อนที่ในทางโค้ง แต่ไม่ได้ทำให้ความเร็วของลมเพิ่มขึ้น เราสามารถแก้สมการหาค่า v ซึ่งเป็นความเร็วของลมเกรเดียนได้ ถ้ารู้รัศมีของความโค้ง เส้นละติจูดที่ลมเกิดขึ้น และค่าแรงความชันของความกด



รูป 10.13 ในชั้นที่มีความเสียดทาน แรงโคลิโอลิสและแรงเสียดทานจะรวมกันเพื่อให้เกิดสมดุลกับแรงความชันของความกดซึ่งจะทำให้ลมพัดข้ามเส้นไอโซบาร์จากบริเวณความกดที่สูงกว่าสู่บริเวณความกดที่ต่ำกว่า โดยที่แรงโคลิโอลิสจะอยู่ทางขวามือของทิศทางลมและแรงเสียดทานจะอยู่ตรงกันกับทิศทางลม

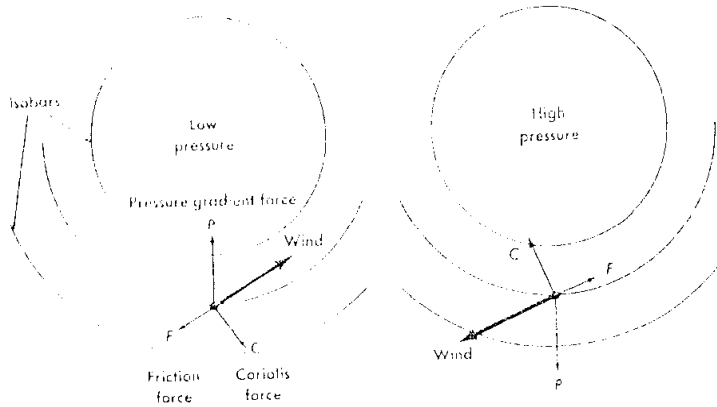


รูป 10.14 ลมในแนวนอนจะเพิ่มความแรงมากขึ้นและเปลี่ยนทิศทางเมื่อขึ้นไปสูงซึ่งจะเกิดขึ้นในชั้นที่มีความเสียดทาน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า รูปก้นหอยของเอ็คมัน

10.3.3 ลมพื้นผิว (Surface Winds)

ทั้งลมจ็โอส ไทรฟิค และลมเกรเดียนเป็นลมที่ไม่มีแรงเสียดทานเนื่องจากเกิดขึ้นเหนือชั้นแรงเสียดทาน (frictional layer) ดังนั้นแรงเสียดทานในชั้นอากาศล่าง ๆ จะมีผลอย่างไรต่อลมพื้นผิว สำหรับการเคลื่อนที่ของอากาศที่มีเสกขนาดใหญ่และเดินทางเป็นเส้นตรง แรงเสียดทาน (F) รวมกับแรงโคริโอลิส (C) จะสมดุลกับแรงความชันของความกดตัน (P_H) ซึ่งแสดงไว้ในรูป 10.13 ผลสุทธิของลมก็คือ ลมจะพัดช้าลง และทำให้ทิศทางเปลี่ยนไปเป็นข้ามเส้นไอโซบาร์เข้าสู่ความกดต่ำ มุมที่เฉไปนี้มีค่าตั้งแต่ประมาณ 10 องศาบนพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ บนมหาสมุทรซึ่งมีความฝืดน้อย จนกระทั่งท่ามม 45 องศาบนพื้นดินที่ขรุขระซึ่งมีความเสียดทานสูง เมื่อเราขึ้นไปสูงจากผิวโลกผ่านชั้นของแรงเสียดทานนั้น ลมที่พัดในแนวนอนจะพัดแรงขึ้น และเปลี่ยนทิศทางเพิ่มขึ้นเป็นรูปก้นหอย (spiral) ทั้งนี้เนื่องจากแรงเสียดทานลดลงนั่นเอง (ดูรูป 10.14) ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Ekman Spiral ตามชื่อนักวิทยาศาสตร์ ในปี ค.ศ. 1905 ที่จุดสูงสุดของการหมุนแบบก้นหอย จะเป็นชั้นที่ไม่มีแรงเสียดทาน ดังนั้นลมที่พัดก็คือลมจ็โอส ไทรฟิคนั่นเอง

ต่อไปนี้จะพิจารณาว่าผลของแรงเสียดทานที่มีต่อลมพื้นผิวที่พัดในบริเวณความกดสูงและบริเวณความกดต่ำในซีกทางเหนือ สำหรับอากาศที่พัดใกล้กับพื้นดินแรงเสียดทาน F จะมีความสำคัญคือจะไปลดความเร็วของลมลง และทำให้ลดค่าแรงโคริโอลิส (C) ลงด้วย แต่ไม่มีผลกระทบต่อแรงความชันของความกด (P_H) (ดูรูป 10.15) ผลสุทธิของแรง (net force)



รูป 10.15 (ซ้าย) ความเร็วลมรอบ ๆ ศูนย์กลางบริเวณความกดต่ำ และรอบ ๆ ศูนย์กลางบริเวณความกดสูงที่อยู่ใกล้กับพื้นดิน ในซีกโลกเหนือเมื่อแรงเสียดทาน F มีความสำคัญ ผลของแรงเสียดทานจะไปลดอัตราเร็วของลมลงและทำให้ลมพัดข้ามเส้นไอโซบาร์เข้าสู่ศูนย์กลางบริเวณความกดต่ำ และลมจะพัดออกจากศูนย์กลางบริเวณความกดสูง

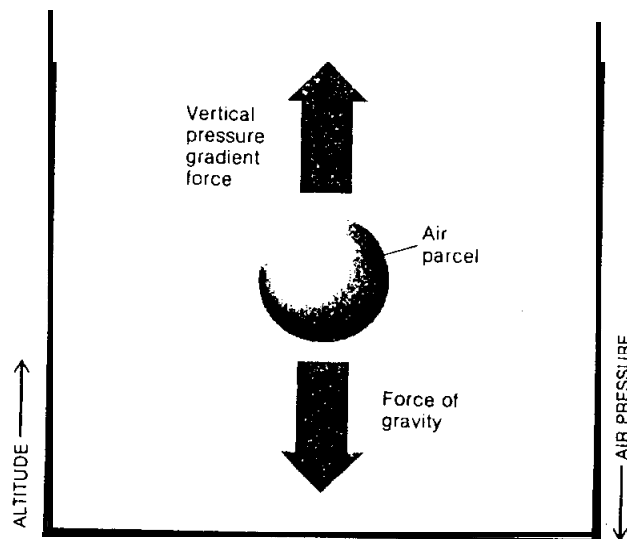
ได้จากการบวกเวกเตอร์ของแรง 3 แรง ซึ่งผลลัพธ์ก็คือลมพัดข้ามเส้นไอโซบาร์ไปยังที่ซึ่งมีความกดต่ำกว่า และในบริเวณความกดต่ำจะพัดเข้าสู่ศูนย์กลางในทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนในบริเวณความกดสูงลมจะพัดออกจากศูนย์กลางในทิศตามเข็มนาฬิกา

ในซีกโลกทางใต้ ลมจะพัดกลับทิศทางกับในบริเวณความกดต่ำและในบริเวณความกดสูงของซีกโลกทางเหนือทั้งนี้เพราะแรงโคริโอลิสจะพัดเฉไปทางซ้ายมือแทนที่จะเฉไปขวามือนั่นเอง

10.3.4 ความสมดุลอุทกสถิต (Hydrostatic Equilibrium)

ในบรรยากาศของเรานั้นเมื่อขึ้นสูงไปจากพื้นดินความกดของอากาศก็ยิ่งน้อยลง ดังนั้นย่อมทำให้เกิดแรงความชันของความกดดันขึ้นในทางตั้ง จากรูป 10.16 แรงอันเกิดจากความชันของความกดดันอันนี้จะมีทิศขึ้นบนจากบริเวณความกดสูงซึ่งพื้นโลกไปยังบริเวณความกดอากาศที่ต่ำกว่าเบื้องบน ถ้ามีแรงนี้แต่เพียงลำพัง แรงความชันของความกดดันในแนวตั้งจะเร่งให้อากาศออกไปจากโลกจนหมด และเราจะไม่มีอากาศหายใจ อย่างไรก็ตามยกเว้นในระบบลมฟ้าอากาศที่รุนแรงที่มีเสถียรขนาดเล็ก แรงความชันของความกดดันในแนวตั้งของบรรยากาศ จะต้องสมดุลพอดีโดยแรงที่เท่ากันและอยู่ตรงข้ามของแรงโน้มถ่วง นี้คือตัวอย่างของกฎข้อที่ 3 ของนิวตัน ความสมดุลของแรงทั้งสองนี้เรียกว่าความสมดุลอุทกสถิต (hydrostatic equilibrium)

ตราบใดที่แรงยังอยู่ในสภาวะสมดุล จะไม่มีความเร่งสุทธิเกิดขึ้น (net acceleration) นั่นคือไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ดังนั้นผลอันเกิดจากความสมดุลของแรงทำให้ก้อนอากาศที่เคลื่อนที่ขึ้นเบื้องบนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และอากาศที่เคลื่อนที่ลงก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เช่นกัน



รูป 10.16 เนื่องจากความสมดุลอุทกสถิต ความชันของความกดในแนวตั้งในทิศเบื้องบนของก้อนอากาศจะถูกทำให้สมดุลพอดีกับแรงโน้มถ่วงในทิศทางลงล่าง

ตัวอย่างที่ 10.8

เราจะต้องขึ้นไปสูงเท่าไร จึงจะมีความกด 950 mb ถ้าความกดที่ระดับน้ำทะเลของทั้งที่ขั้วโลกและที่ศูนย์สูตรเท่ากับ 1000 mb กำหนดให้ที่ศูนย์สูตรซึ่งมีอากาศร้อนมีความหนาแน่นของอากาศ 1.1 Kg/m^3 ในขณะที่อากาศที่ขั้วโลกซึ่งเย็นกว่าและหนาแน่นกว่ามีความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.3 Kg/m^3

วิธีทำ :

เมื่อบรรยากาศอยู่ในความสมดุลทุกสถิติ ค่าความเร่งที่เกิดจากความชันของความกดในแนวตั้ง จะหักล้างกันพอดีกับความเร่งอันเกิดจากแรงโน้มถ่วง

$$g = a_{PG}$$

$$\text{หรือ} \quad g = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dn}$$

ที่เส้นศูนย์สูตร

$$10 \text{ m/s}^2 = \frac{1}{(1.1 \text{ Kg/m}^3)} \frac{(5000 \text{ N/m}^2)}{dn}$$

$$dn = 455 \text{ m}$$

ที่ขั้วโลก

$$10 \text{ m/s}^2 = \frac{1}{(1.3 \text{ Kg/m}^3)} \frac{(5000 \text{ N/m}^2)}{dn}$$

$$dn = 384 \text{ m}$$

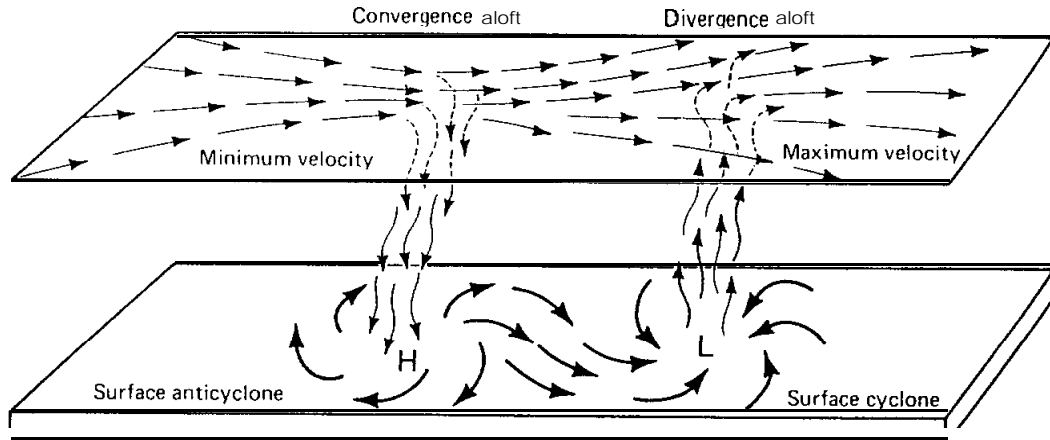
ดังนั้นความแตกต่างในความสูงสำหรับที่ศูนย์สูตรเท่ากับ 455 m และที่ขั้วโลกเท่ากับ 384 m จะเห็นว่าอากาศยิ่งหนาแน่นมากหรือยิ่งเย็นมาก ความแตกต่างของความสูงระหว่างความแตกต่างของความกดสองระดับก็ยิ่งน้อยลง

ความสมดุลทุกสถิติมีความสำคัญต่อนักบิน เนื่องจากเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความสูงเมื่อความกดเปลี่ยนแปลง นักบินสามารถสร้างเครื่องมือวัดความสูงที่เรียกว่า อัลติมิเตอร์ (altimeter) จากเครื่องมือวัดความกดบารโรมิเตอร์ได้ แต่ต้องระมัดระวังในการแก้สภาวะความผิดพลาดของความกดและอุณหภูมิพื้นดินให้ถูกต้อง มิฉะนั้นอาจเป็นผลให้เครื่องบินตก

10.4 ความต่อเนื่องของลม (Continuity of Wind)

อากาศเป็นของไหลที่ต่อเนื่อง ความต่อเนื่องนี้มีความหมายถึงการเกี่ยวพันระหว่างส่วนประกอบในแนวอนและส่วนประกอบในแนวตั้งของลม โดยการพิจารณาการพัดของลมในบริเวณความกดต่ำและการพัดของลมในบริเวณความกดสูง เราสามารถอธิบายถึงความสำคัญที่เกี่ยวข้องกันนี้ได้

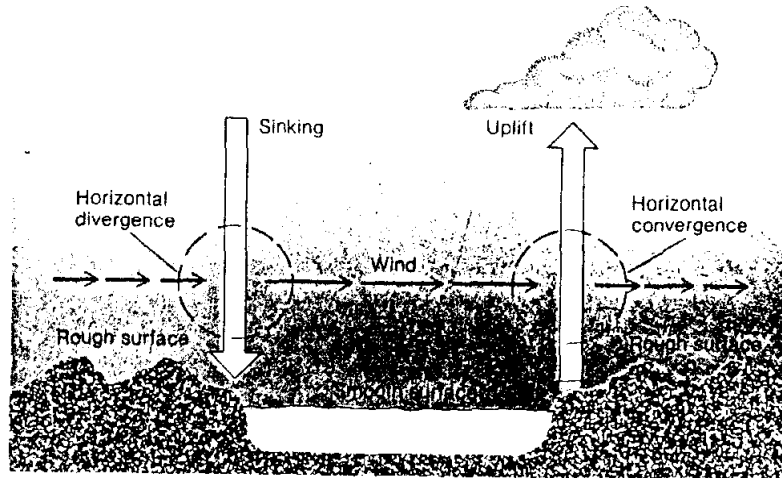
ตั้งที่กล่าวแล้วว่าลมที่พัดในบริเวณความกดสูงของซีกโลกทางเหนือจะพัดวนออกจากศูนย์กลางในทิศตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นลมที่พัดในแนวอนที่พื้นผิวจะลู่ออก (divergence) จากศูนย์กลางของบริเวณความกดสูง ซึ่งไม่ทำให้เกิดสูญญากาศที่ศูนย์กลางนี้ แต่จะมีอากาศถูกดึงให้ลงมาจากเบื้องบนลงมาซ้ำ ๆ และแทนที่อากาศที่พัดลู่ออกจากกัน ณ พื้นผิวโลก (ดูรูป 10.17) อากาศที่จมตัวลงมานี้จะอัดตัวและอุ่นขึ้นอย่างเอเดียบเตติก ทำให้ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าน้อยลง ท้องฟ้าจะแจ่มใส (fair) ในบริเวณความกดสูงเบื้องล่าง ส่วนในเบื้องบนนั้นลมจะพัดสอเข้าหากัน (convergence) ลู่ศูนย์กลางของบริเวณความกดสูง ดังนั้นเป็นการชดเชยอากาศที่จมตัวลง โดยกลับกันลมพื้นผิวในบริเวณความกดต่ำของซีกโลกทางเหนือจะพัดเข้าสู่ศูนย์กลางในทิศทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นลมจะพัดสอ (convergence) เข้าสู่ศูนย์กลางและทำให้อากาศลอยตัวสูงขึ้นในแนวตั้ง ซึ่งจะขยายตัวและเย็นตัวลงอย่างเอเดียบเตติก และทำให้ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น เมฆและฝนจะก่อตัวขึ้น ดังนั้นในบริเวณศูนย์กลางความกดต่ำจะเป็นระบบอากาศที่เป็นพายุ ส่วนในเบื้องบนนั้น ลมจะพัดลู่ออกจากศูนย์กลางของบริเวณความกดต่ำจึงเป็นการชดเชยสำหรับอากาศที่ลอยตัวขึ้น



รูป 10.17 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลม เบื้องบนและการไหลของอากาศในส่วนล่างของชั้น โทร โปสเฟียร์ โซนที่มีการพัดสอเข้าหากันจะทำให้เกิดการ ไหลลงของอากาศสู่ข้างล่าง ในขณะที่บริเวณที่มีการพัดลู่ออก จะทำให้เกิดการ ไหลขึ้นของอากาศ

การเคลื่อนที่ ในแนวตั้ง อาจจะถูกทำให้เกิดขึ้น โดยลมที่พัดไปข้างหน้า เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของแรงเสียดทาน (frictional resistance) พื้นผิวของโลกยิ่งขรุขระความต้านทานที่มีต่อลม ในแนวอนก็ยิ่งมาก เมื่อลมพัดจากพื้นผิวขรุขระ ไปยังพื้นผิวที่เรียบกว่า เช่นพัดจากแผ่นดินสู่ทะเล ลมจะเกิดความเร่งขึ้น (ดูรูป 10.18) ความเร่งนี้จะทำให้ลมพัด

ลู่ออก ดังนั้นจะดึงให้ลมจากเบื้องบนลงมาข้างล่าง และกลับกันเมื่อลมพัดจากพื้นผิวที่เรียบ ไปยังพื้นผิวที่ขรุขระ ลมถูกทำให้พัดช้าลง และเกิดการกองโตขึ้น (convergence) ซึ่งเป็นเหตุให้อากาศเคลื่อนที่ขึ้นข้างบน นี่คือเหตุผลอันหนึ่งที่ชายฝั่งทะเลจึงมีเมฆคิวมูลัสเกิดขึ้น



รูป 10.18 ลมพื้นผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงลู่ออก (divergence) ในแนวนอน เมื่อพัดจากพื้นผิวที่ขรุขระไปยังพื้นผิวที่เรียบ และจะเกิดการพัดสอเข้าหากัน (convergence) ในแนวนอน เมื่อพัดจากพื้นผิวที่เรียบ ไปยังพื้นผิวที่ขรุขระ การพัดลู่ออกในแนวนอนของอากาศทำให้อากาศข้างบนจมตัวลง และการพัดสอเข้าหากันในแนวนอนของอากาศทำให้อากาศลอยตัวสูงขึ้น ทำให้เกิดเมฆ

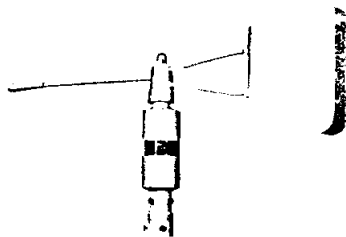
10.5 การวัดลม

ลมคืออากาศที่เคลื่อนที่ในแนวนอน ถ้าเป็นการเคลื่อนไหวของอากาศในแนวตั้งก็จะเรียกว่ากระแสอากาศ ลมมีความสำคัญพื้นฐานในการทำให้เกิดลมฟ้าอากาศ ประการแรกการเคลื่อนที่ของตัวอากาศเองเป็นองค์ประกอบของลมฟ้าอากาศที่สำคัญ เช่น ในวันที่ลมสงบของฤดูหนาว อาจจะมีความรู้สึกสบาย แต่ถ้ามีลมพัดจัดก็อาจมีความรู้สึกตรงกันข้าม ประการที่สอง สภาวะกายภาพ (physical condition) ของอากาศส่วนใหญ่ขึ้นกับแหล่งกำเนิด (source) ของอากาศเอง และขึ้นกับการเคลื่อนที่ในแนวนอน ลมจะเปลี่ยนเป็นมีความชื้นมากเมื่อพัดผ่านผิวน้ำที่

กว้างและจะนำความชื้นมาสู่แผ่นดิน อากาศจะเปลี่ยนเป็นเย็นจัดเมื่ออยู่เหนือบริเวณที่หิมะปกคลุม และจะพัดไปยังบริเวณที่อุ่นกว่า เช่นเดียวกับอากาศที่อุ่น จะถ่ายเท (transported) ไปยังบริเวณที่เย็นกว่า เพื่อที่จะอธิบายถึงการเคลื่อนที่โดยไม่ได้หยุดถึงสภาวะของอากาศที่เคลื่อนที่ (condition of the moving air) สิ่งที่เกี่ยวข้องกับลมที่จะต้องสังเกตคือ ทิศทาง และความเร็วลม

10.5.1 ทิศทางลม

ศรลม (wind vane) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดทิศทางลมตั้งแต่สมัยโบราณ (รูป 10.19) โดยที่หัวลูกศรจะชี้เข้าไปในลมที่พัดมา (point into the wind) การดัดแปลงเครื่องมือก็คือ รูป 10.20 ซึ่งเป็นถุงลมที่ติดตั้งไว้ที่สถานีบิน โดยที่ถุงลมจะชี้ตามลม (down wind) ชื่อของลมได้จากทิศทางที่ลมพัดมา เช่นลมพัดจากตะวันออกไปตะวันตกจะเรียกว่าลมฝ่ายตะวันออก (east wind) และลมที่พัดจากทิศตะวันตกเฉียงเหนือไปยังทิศตะวันออกเฉียงใต้จะเรียกว่าลมฝ่ายตะวันตกเฉียงเหนือ ศรลมอาจจะเชื่อมไปยังหน้าปัดด้วย เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะอ่านเป็นทิศหรือองศา ก็ได้ ลมฝ่ายตะวันออกจะมีค่าเท่ากับ 90 องศา ลมฝ่ายใต้จะมีค่าเป็น 180 องศา ลมฝ่ายตะวันตกมีค่า 270 องศา และลมฝ่ายเหนือมีค่า 360 องศา ลมจะบันทึกเป็น 0 องศา เฉพาะในกรณีที่สงบ (ดูรูป 10.21)

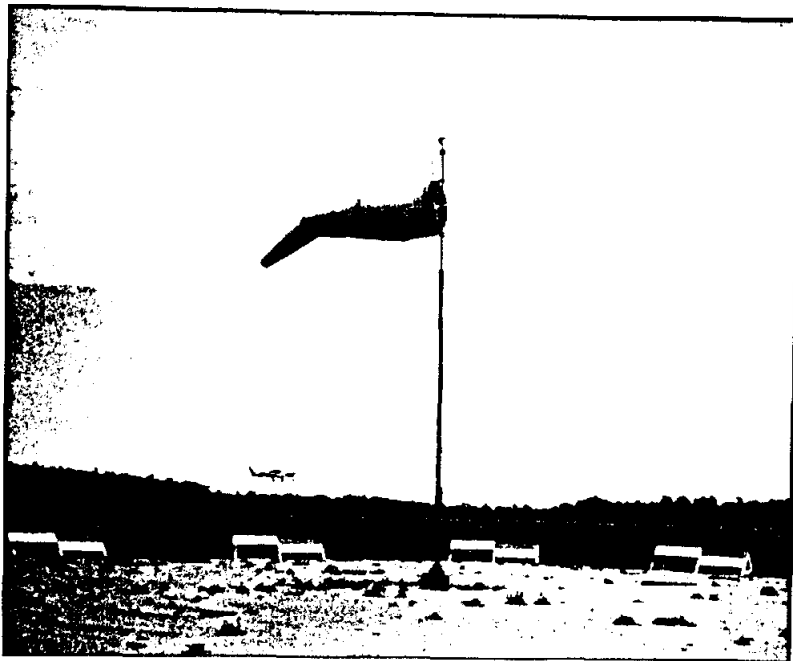


รูป 10.19 ทิศทางของลมได้จากศรลม แขนของเครื่องมือจะชี้เข้าไปในทิศที่ลมพัดมา

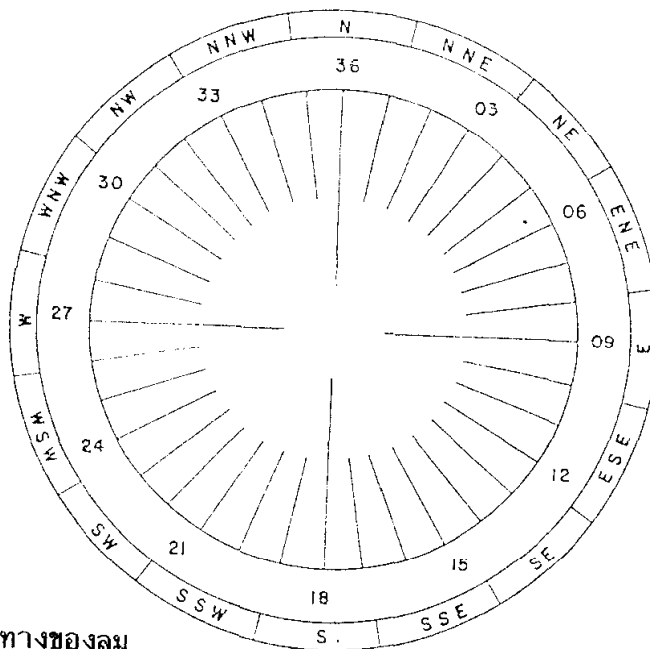
ทิศทางของลมจะเขียนบนแผนที่อากาศโดยเขียนลูกศร (wind shaft) เข้าสู่สถานีจากทิศทางที่ลมพัดมา ความเร็วของลมจะแสดงที่หางของลูกศร โดยมีลักษณะเป็นดังนี้

10.5.2 ความเร็วลม

ความเร็วลมสามารถวัดได้จากผลของลมที่มีต่อพื้นผิวของมหาสมุทรหรือวัตถุที่เคลื่อนไหวยาว เช่น ต้นไม้ คานไฟ ธง เป็นต้น ในการสังเกตลมเช่นนี้เป็นพื้นฐานจากเสกัลของโบฟอร์ต (Beaufort scale) ซึ่งเซอร์ฟรานซิส โบฟอร์ต สร้างขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1805 ดังแสดงไว้ในตาราง 10.1



รูป 10.20 ถูกลมที่ติดตั้งไว้ตามสนามบินจะบอกถึงทิศทางและความเร็วของลม



รูป 10.21 ชื่อและทิศทางของลม

Beaufort Scale of Wind Force*

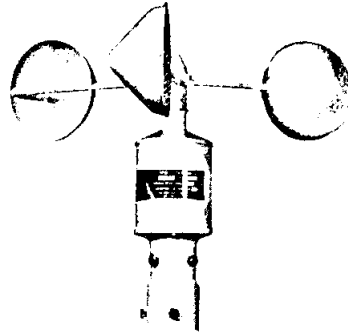
BEAUFORT NUMBER	GENERAL DESCRIPTION	LAND AND SEA OBSERVATIONS FOR ESTIMATING WIND SPEEDS	WIND SPEED 10 M ABOVE GROUND (KM/HR)
0	Calm	Smoke rises vertically. Sea like mirror.	Less than 1
1	Light air	Smoke, but not wind vane. shows direction of wind. Slight ripples at sea.	1 - 5
2	Light breeze	Wind felt on face, leaves rustle, wind vanes move. Small, short wavelets.	6-11
3	Gentle breeze	Leaves and small twigs moving constantly, small flags extended. Large wavelets, scattered whitecaps.	12-19
4	Moderate breeze	Dust and loose paper raised, small branches moved. Small waves, frequent whitecaps.	20-28
5	Fresh breeze	Small leafy trees swayed. Moderate waves.	29-38
6	strong breeze	Large branches in motion, whistling heard in utility wires. Large waves, some spray.	39-49
7	Near gale	Whole trees in motion. White foam from breaking waves.	50-61
8	Gale	Twigs break off trees. Moderately high waves of great length.	62-74
9	strong gale	Slight structural damage occurs. Crests of waves begin to roll over. Spray may impede visibility.	75-88
10	Storm	Trees uprooted, considerable structural damage. Sea white with foam, heavy tumbling of sea.	89-102
11	Violent storm	Very rare; widespread damage. Unusually high waves.	103-117
12	Hurricane	Very rare; much foam and spray greatly reduce visibility.	118 and over

*Developed in 1805 by Irish hydrographer Sir Francis Beaufort

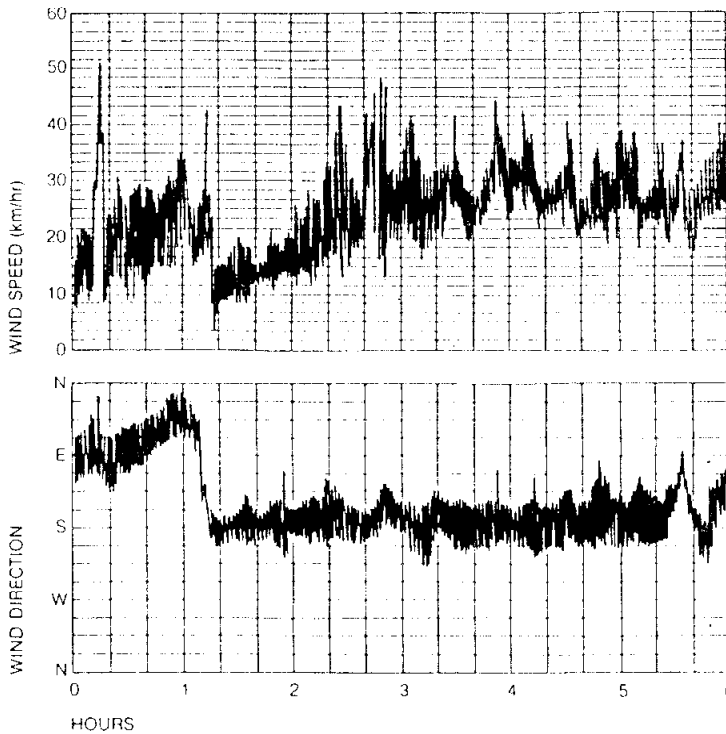
ตาราง 10.1 ตารางของไบฟอร์ท

เพื่อที่จะวัดค่าลมให้ถูกต้องเที่ยงตรงยิ่งขึ้นก็โดยการใช้เครื่องมือ แอนนิโมมิเตอร์ ชนิดลูกถ้วย (cup anemometer) ซึ่งแสดงไว้ในรูป 10.22 เครื่องมือนี้ทำงานเช่นเดียวกับเครื่องวัดความเร็วของรถยนต์ ลมจะพัดให้ถ้วยหมุนและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่จะเปลี่ยนเป็นความเร็วบนหน้าปัด โดยมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที กิโลเมตรต่อชั่วโมง ไมล์ต่อชั่วโมง หรือน็อต (1 น็อต = 1 ไมล์ทะเล (1.85 ก.ม.) ต่อชั่วโมง)

การบันทึกความเร็วลมและทิศทางติดต่อกันบางครั้งก็มีประโยชน์ โดยที่ทั้งศรลมและแอนนิโมมิเตอร์จะเชื่อมกับปากกา ซึ่งจะจดบันทึกลงบนกระดาษกราฟที่หมุนด้วยลานนาฬิกา (รูป 10.23)



รูป 10.22 แอนนีโมมิเตอร์ชนิดลูกถ้วยที่ใช้ในการวัดความเร็วลม ลมยิ่งพัดแรงลูกถ้วยก็จะยิ่งหมุนเร็ว



รูป 10.23 การบันทึกทิศทางและความเร็วของลมด้วยกราฟ

แรงของลมที่กระทำต่อวัตถุบนพื้นที่ใด ๆ ที่กำหนดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อความเร็วลมยกกำลังสอง ดังนี้

$$F \propto \text{พื้นที่} \times (\text{ความเร็วลม})^2$$

หรือ
$$F = KAV^2 \quad (\text{เมื่อ } A = \text{พื้นที่})$$

ในการคำนวณหาความกดบนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับลม

$$P = \frac{F}{A}$$

แทนค่า $F = KAV^2$ ลงในสูตรข้างบนได้

$$P = \frac{KAV^2}{A} = KV^2$$

ถ้าความเร็วลมเป็นไมล์ต่อชั่วโมง ความกดมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางฟุต ค่า K ซึ่งเป็นค่าคงที่จะเท่ากับ 0.004 ดังนั้นสูตรก็คือ

$$P = 0.004 V^2$$

เนื่องจากค่าความกดเป็นแรงต่อตารางฟุต ถ้าหากเป็น 100 ตารางฟุต เราก็ต้องนำค่าแรงคูณด้วย 100 เป็นต้น