บทที่ 2

อิทธิพลของสภาพแวดล้อมและสถานะการไหลของความร้อน

ในโครงสร้างทั่ว ๆ ไปนั้น ตัวประกอบสำคัญที่มีผลต่อโครงสร้างก็คือ น้ำหนักคงที่ (Dead load และน้ำหนักจร (Live load) นอกจากนี้ยังมีตัวประกอบย่อยอื่น ๆ อีกคือ ความล้า (Creep) การหดตัว (Shrinkage) ความชื้นและการทรุดตัวของค้ำยัน แต่ในโครงสร้างคานที่อยู่ในภาวะกลางแจ้งนี้จะมีอุณหภูมิของวัสดุเป็นตัวประกอบสำคัญอีกอย่างหนึ่งเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่เริ่มแรก (primary movement) และการเหนี่ยวนำแรงขึ้น (induced stress) แต่อุณหภูมิของตัววัสดุนี้จะเกิดขึ้นได้จากสภาวะแวดล้อมรวมตัวเป็นผู้กระทำ ก็คือ การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศ ความเร็วลม และตัวประกอบอื่นที่ทำให้อุณหภูมิของวัสดุนี้ผิดกันไปก็คือ สถานะการไหลของความร้อน (Heat flow condition) ภายในของวัสดุเอง อันได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุเอง

สภาวะแวดล้อมและสถานะการไหลของความร้อนนี้จะได้กล่าวในบทที่ต่อไป

2.1 สภาวะแวดล้อม

อุณหภูมิในโครงสร้างคานที่อยู่ในภาวะกลางแจ้งนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละวัน (daily) และแต่ละฤดูกาล (seasonal) ตามการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม สภาวะแวดล้อมตามฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงก็ได้แก่ ฤดูร้อน ฤดูหนาว ฤดูฝน ซึ่งสภาพเหล่านี้ ยังความแตกต่างกันต่อการยืดตัวและหดตัวของโครงสร้างคาน (Expansion and Contraction) ซึ่งถ้าโครงสร้างคานนี้เป็นแบบอิสระในการขยายตัวหรือหดตัวตามแกนยาว (Longitudinal) การเหนี่ยวนำหน่วยแรง (induced stress) ก็จะไม่เกิดขึ้น ส่วนสภาวะแวดล้อมในแต่ละวันนั้น มีผลน้อยมากต่อการยืดตัวและหดตัวในแต่ละวันที่เกิดขึ้น แต่สิ่งที่จำเป็นก็คือ การโก่งตัวของโครงสร้างซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำหน่วยแรง (induced stress) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นผลจากความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ภายในโครงสร้าง อันเป็นการลาดชันและไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear) และความเป็นอินดีเทอร์มิเนท (Indeterminate) ของ

โครงสร้างคาน

จากการสรุปของ Emerson[7] นั้นได้กล่าวไว้ว่า สภาวะแวดล้อมที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการกระจายของอุณหภูมิได้แก่ การแผ่รังสี อุณหภูมิอากาศและความเร็วลม การเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมดังกล่าวนั้นจะได้อธิบายดังนี้

2.1.1 การแผ่รังสี

การแผ่รังสี (Solar radiation, Isolation) เป็นตัวการสำคัญที่สุดที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในตัววัสดุตลอดความลึกของโครงสร้างที่อยู่ในภาวะกลางแจ้ง การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะมากที่สุดในวันที่มีอากาศแจ่มใส โดยที่รังสีของดวงอาทิตย์จะถูกดูดเข้าไปจากผิวบนของวัสดุที่ถูกรังสีนั้นกระทบ ทำให้ผิววัสดุนั้นได้รับความร้อนอย่างรวดเร็วมากกว่าตัววัสดุภายใน ทำให้เกิดการถ่ายเทอุณหภูมิในตัววัสดุขึ้นตลอดหน้าตัดโครงสร้าง

จากการศึกษาได้พบว่า อุณหภูมิของผิวจะเพิ่มขึ้นมาก ถ้าหากว่าความเข้มของรังสีที่ถูกดูดนั้นเพิ่มขึ้น และจำนวนที่จะถูกดูดนั้นขึ้นกับการแผ่ของรังสี โดยความเข้มของรังสีจะมากที่สุดถ้าผิวนั้นตั้งฉากกับลำแสงรังสี และจะเป็นศูนย์ ถ้าลำแสงรังสีขนานกับพื้นผิว ดังนั้น ความเข้มของรังสีที่พื้นผิวระนาบย่อยจะได้รับนั้นจะเริ่มจากศูนย์ในตอนกลางคืนและจะเริ่มมีค่าเมื่อดวงอาทิตย์เริ่มขึ้น และจะสูงสุดในช่วงกลางวันและจะเป็นศูนย์อีกครั้งเมื่อดวงอาทิตย์ได้ตกไปแล้ว

จากการวัดในสนามนั้น แสดงว่า การเปลี่ยนแปลงของการแผ่รังสีประจำวันบนผิวระนาบนอนนั้น ขึ้น ๆ ลง ๆ (Sinusoidal) โดยที่ Gloyne[8] ได้แนะนำว่า ส่วนโค้งในรูปของ $(sine)^2$ โดยเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ได้ว่า

$$I(t) = \frac{2S}{T} \sin^2 \alpha \qquad (2.1)$$

โดยมี $I(t)$ = ความเข้มของรังสีที่เวลา t $btu/ft^2/hr.$

หรือ $Cal/ft^2/hr.$

S = การแผ่รังสีทั้งหมดใน 1 วัน btu/ft^2

$Calorie/m^2$

T = ช่วงเวลากลางวัน ชั่วโมง

$\alpha = \frac{\P t}{T}$

แต่จากคำแนะนำของ Strock[23] ได้แก้ไขใหม่ โดยอาศัยวิธีทดลองและแก้ไข (Trial and error) ได้ว่า

$$I(t) = \frac{1.7S}{T}\left(\frac{Sin^2\alpha + 2Sin\ \alpha}{3}\right) \qquad (2.2)$$

2.1.2 อุณหภูมิอากาศ

อุณหภูมิอากาศจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากตามที่ตั้งของแต่ละส่วนบนโลกและตามฤดูกาล ในปี ๆ หนึ่ง

ส่วนในแต่ละวันนั้น ในสภาพอากาศแจ่มใส อุณหภูมิของอากาศจะเริ่มจากส่วนต่ำในช่วงก่อนย่ำรุ่งแล้วจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณเวลา 12.00-15.00 น. แล้วจะค่อย ๆลดลงจนถึงอุณหภูมิต่ำสุดในแต่ละวันนั้นก่อนย่ำรุ่ง

ส่วนในวันที่มีเมฆมากนั้น เมฆจะเป็นตัวกันรังสีของดวงอาทิตย์ไม่ให้มายังโลกได้ ทำให้ในกลางวันอุณหภูมิจะไม่ร้อนมากนัก แต่ในตอนกลางคืน เนื่องจากเมฆเป็นตัวกันมิให้ความร้อนออกไป จึงมีการสะท้อนกลับมายังผิวโลก ทำให้อุณหภูมิอากาศสูงขึ้นเล็กน้อยได้ในตอนกลางคืนบางขณะ

2.1.3 ความเร็วลม

ความเร็วลมมีผลอย่างมากต่อการขึ้นหรือลงของอุณหภูมิที่ผิววัสดุ เพราะจะเป็นตัวพาความร้อนออกไปจากวัสดุได้ จากการค้นคว้าของ ดร. ทักษิณ[15] ได้พบว่า ความ

ลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature graduent) จะสูงสุดหากว่าในวันนั้นไม่มีลมพัด

2.2 การไหลของความร้อน

ในการคาดคะเนเวลาที่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการกระจายอุณหภูมิต่อโครงสร้างในภาวะกลางแจ้งนั้น จะต้องอาศัยสมการการไหลของความร้อนที่ควบคุมการไหลของความร้อนได้ทั้งภายนอกและภายในโครงสร้าง

โดยทั่วไปความร้อนจะถ่ายเทให้กันระหว่างวัสดุโครงสร้างและสิ่งแวดล้อมก็โดยการแผ่รังสี (Radiation) และการพาความร้อน (Convection) แต่ความร้อนที่ถ่ายเทในตัววัสดุโครงสร้างเองจะเป็นการนำความร้อน (Conduction) ซึ่งการไหลของความร้อนนั้นสามารถกล่าวโดยละเอียดคือ

2.2.1 การไหลโดยการแผ่รังสี (Heat flow by radiation)

การแผ่รังสีนี้เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เป็นผลจากความร้อนหรือความเย็นของผิวนอกโครงสร้าง ซึ่งผิวนอกจะได้รับความร้อนก็จากดูดซึมการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์และกจะถ่ายเทออกไปให้กับอากาศได้บ้าง โดยการแผ่รังสีออกไปในตอนกลางคืน

การดูดซึมและการถ่ายเทออกของความร้อนนี้นั้นกับคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่เป็นโครงสร้างเองคือ ความสามารถดูดรับความร้อน (Absorptivity) และความสามารถในการถ่ายเทออก (Emissivity) ของผิว โดยค่าความสามารถดูดรับความร้อนนี้ขึ้นกับสีผิวของวัสดุที่รับ โดยทั่วไปแล้วในวัสดุที่เป็นคอนกรีตจะมีค่าระหว่าง 0.5-0.8 แต่ถ้าการถ่ายเทความร้อนออกนั้นไม่ได้ขึ้นกับสีผิววัสดุเลย โดยคอนกรีตมีค่าระหว่าง 0.85-.095 (ดูตารางที่ 1 ประกอบ)

ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสี มีทั้งแบบคลื่นสั้นและคลื่นยาว โดยค่าความร้อนนั้นถูกดูดซึมจากผิววัสดุจะเป็นคลื่นสั้น ซึ่งได้ว่า

$$Q_s = rI \qquad (2.3)$$

โดยที่ Q_s = ความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสีแบบคลื่นสั้น btu/ft^2/hr. Cal/m^2/hr

r = ความสามารถดูดซึมความร้อนของผิววัสดุ

I = ความเข้มของการแผ่รังสี btu/ft^2/hr. Cal/m^2/hr

ความร้อนที่ถ่ายเทให้โดยการแผ่รังสีแบบคลื่นยาวอาศัยกฎของ Stefen-Boltzmann ซึ่งกล่าวว่าทุกวัสดุจะแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic energy) ออกมาที่อัตราที่เป็นสัดส่วนกับกำลังที่มีค่าองศาสมบูรณ์ (Absolute Temperature) ของวัสดุ จะได้ว่า

$$Q_e = e\sigma\theta^4 \qquad (2.4)$$

โดยที่ Q_e = พลังงานที่ถ่ายออกมา btu/ft^2/hr. Cal/m^2/hr

e = ความสามารถในการถ่ายความร้อนออกมา (emissivity)

α = Stefan-Boltzmann constant

= 0.172 x 10^{-8} btu/ft^2/hr/$^oF^4$

θ = องศาสัมบูรณ์ , ^oR

Chapman[26] ได้แสดงให้เห็นว่า ความร้อนที่สูญเสียไปโดยการแผ่รังสีแบบคลื่นยาว (long-wave radiation) จากผิวโครงสร้างไปยังสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้ว่า

$$Q_L = e\,(\theta_s^4 - Q_a^4) \qquad (2.5)$$

โดยที่ Q_L = ความร้อนที่สูญเสียแบบคลื่นยาว btu/ft^2/hr. Cal/m^2/hr

Q_s = อุณหภูมิผิว ^oR

Q_a = อุณหภูมิอากาศ ^oR

จาก Williamson[24] ได้กล่าวว่า สมการของ 2.5 นั้นเหมาะกับการประมาณการแผ่รังสีที่เสียไปจากผิวโลกและสภาพแวดล้อมในสภาวะกับฟ้ามีเมฆปกคลุม (Cloudy sky) แต่จะได้ค่าความร้อนที่สูญเสียไปจากผิวต่ำไป ในสภาวะท้องฟ้าแจ่มใส เพราะถือว่าเมฆนั้นมีรูปร่างเป็นวัสดุดึงดูดการแผ่รังสีในตอนกลางวันและคายออกในตอนกลางคืน จาก

Swinbank ได้ว่าการแผ่รังสีแบบคลื่นยาวที่ได้รับ เป็น

$$R = \varepsilon\theta_a^{\,6} \qquad (2.6)$$

เมื่อ R = การรับการแผ่รังสีแบบคลื่นยาวในสภาวะแจ่มใส $btu/ft^2/hr.$

ε = 0.496×10^{-14} $btu/ft^2/hr/^oR^6$

θ_a = อุณหภูมิอากาศ ^oR

เมื่อดัดแปลงสมการ 2.4, 2.5, 2.6 จะได้ว่า การแผ่รังสีที่สูญเสียไปที่ผิวของวัสดุในภาวะกลางแจ้ง จะได้

$$Q_{Lc} = e\sigma\theta_s^{\,4} - \varepsilon e\theta_a^{\,6} \qquad (2.7)$$

เมื่อ Q_{Lc} = ความร้อนสุทธิที่สูญเสียจากการแผ่รังสีแบบคลื่นยาวภายใต้ภาวะท้องฟ้าแจ่มใส $btu/ft^2/hr.$

2.2.2 การไหลของความร้อนโดยการพาความร้อน

การไหลของความร้อนโดยการพาความร้อนจากผิววัสดุไปยังสิ่งแวดล้อมได้ว่า ความร้อนที่สูญเสียไปจะเป็นสัดส่วนกำลังที่หนึ่งของความแตกต่างอุณหภูมิ จากรูปที่แสดงโดย Williamson[24] สรุปว่า ความร้อนที่สูญเสียโดยการพาความร้อนในผิววัสดุแห้งได้

$$Q_c = h_c(T_s - T_a) \qquad (2.8)$$

เมื่อ Q_c = ความร้อนที่สูญเสียโดยการพาความร้อน $btu/ft^2/hr$

T_s = อุณหภูมิผิว ^oF

T_a = อุณหภูมิอากาศ ^oF

h_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

= $0.665+0.133\ u$ $btu/ft^2/hr/^oF$

u = ความเร็วลม mph

2.2.3 การไหลโดยการนำความร้อน

ความร้อนที่ถ่ายเทภายในตัววัสดุเองจะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน (Conduction) ซึ่งจะขึ้นกับเวลาในช่วงล่าง ๆ โดยอาศัยสมการการนำความร้อนตามเวลา (Transient heat-conduction)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad (2.9)$$

เมื่อ T = อุณหภูมิของมวลที่แปรตาม t, x, y, z, $^{\circ}F$, $^{\circ}C$

t = เวลา ชม.

x, y, z = ทิศทางแนวแกนที่ตั้งฉากกัน ft.

k = ความสามารถนำความร้อนของวัสดุ btu/hr/ft/$^{\circ}F$, Cal/hr/m/$^{\circ}C$

ρ = ความหนาแน่น lb/ft^3 kg/m^3

c = ความร้อนจำเพาะ btu/lb/$^{\circ}F$, Cal/kg/$^{\circ}C$

จากการทดลองของ Billington[22] ได้แสดงว่าความสามารถพาความร้อนของวัสดุจะมีค่ามากตามความหนาแน่นของวัสดุที่เพิ่มขึ้น (ดังรูป 11) แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความนำความร้อนของวัสดุ คอนกรีตนี้จะประมาณ 0.81 btu/hr/ft/$^{\circ}F$ (1205.58 Cal/hr/m/$^{\circ}C$

คุณสมบัติในการนำความร้อนนี้จะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย