การจำลองการถ่ายเทความร้อนในร่างกายมนุษย์

ธีรพจน์ เวศพันธุ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ปทุมธานี 12110

E-mail: teerapot@eau.ac.th

รับบทความ: 20 กันยายน 2553 ยอมรับตีพิมพ์: 25 พฤศจิกายน 2553

บทคัดย่อ

การศึกษาเรื่องการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อที่มีเลือดไหลเวียนกำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบัน บทความนี้นำเสนอหลักการการจำลองการถ่ายเทความร้อนในร่างกายมนุษย์เพื่อช่วยในการประเมินความเสี่ยงในการรักษาโรคโดยวิธีการให้ความร้อน การจำลองการถ่ายเทความร้อนในร่างกายมนุษย์นิยมใช้สมการไบโอฮีทที่พิจารณาถึงการนำความร้อน การพาความร้อนจากการไหลเวียนของเลือดและความร้อนจากการสันดาปของเนื้อเยื่อ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในร่างกายนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับแพทย์ในการรักษาโรคได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ: การจำลองการถ่ายเทความร้อน, สมการไบโอฮีท, การไหลเวียนของเลือด

Simulation of Heat Transfer in Human Body

Teerapot Wessapan

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Eastern Asia University, Pathumthani 12110, Thailand

E-mail: teerapot@eau.ac.th

Abstract

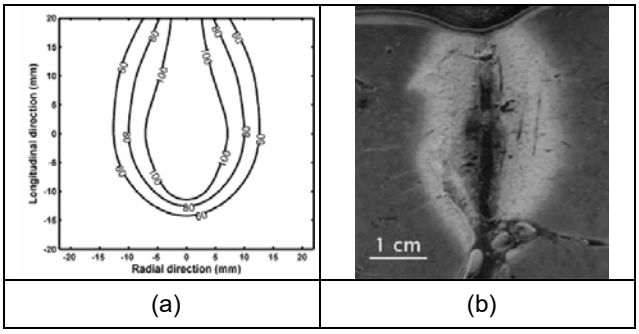
At present, the knowledge of heat transfer in blood-perfused tissue has been a topic of interest. This paper presents a use of human heat transfer simulation for risk assessment in hyperthermia treatment. Heat transfer in human tissues, which is usually expressed by the bioheat equation. It involves thermal conduction, blood perfusion, and metabolic heat generation. The mathematical model of bioheat transfer can be useful for the physicians in enabling them to optimize their surgical protocols.

Keywords: heat transfer simulation, bioheat equation, blood perfusion

บทนำ:

การรักษาโรคโดยวิธีการให้ความร้อน (hyperthermia) มีมานานแล้ว โดยเฉพาะการแพทย์แผนตะวันออกที่มีการรักษาโรคด้วยความร้อนแบบการให้ความร้อนเป็นบริเวณกว้าง และการให้ความร้อนเฉพาะจุด ปัจจุบันการแพทย์สมัยใหม่มีการนำการรักษาโรคโดยใช้ความร้อนมาใช้ในการรักษาโรคร้ายต่างๆ เช่น เนื้องอก มะเร็งทรวงอก และมะเร็งตับ เป็นต้น ทั้งนี้ต้องมีการวิเคราะห์โดยการคำนวณก่อนแล้วจึงทำการรักษาทางกายภาพและใช้วิธีการเชิงวิศวกรรมมาช่วยในการประเมินความเสี่ยงในการรักษา

จากการพัฒนาทางด้านระเบียบวิธีเชิงตัวเลข และเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ การคำนวณการถ่ายเทความร้อนในร่างกายมนุษย์จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างสูง โดยเฉพาะวงการแพทย์สมัยใหม่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงในการรักษาโรค ดังนั้นองค์ความรู้ที่เกี่ยวเนื่องกับการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อที่มีระบบการไหลเวียนเลือดจึงมีความจำเป็นสำหรับทางการแพทย์เป็นอย่างสูงในการพัฒนาเทคโนโลยีในการรักษาโรค ดังนั้นจึงมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในเนื้อเยื่อไปใช้ในการรักษาโรคอย่างกว้างขวาง เช่น การจำลองการทำลายเนื้องอกด้วยความร้อน (พรทิพย์ แก่งอินทร์ และคณะ, 2552) การผ่าตัดด้วยความเย็น (Shi et al., 2009) และ การผ่าตัดด้วยเลเซอร์ (Shen et al., 2005) เป็นต้น



(a) (b)

ภาพที่ 1 การทำลายเซลล์มะเร็งโดยใช้ความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ (Yang et al., 2007) (a) แสดงการจำลองการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในตับจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และ (b) ผลลัพธ์ที่ได้จากการรักษา

ภาพที่ 1 แสดงการถ่ายเทความร้อนเพื่อใช้ในการรักษาโรค ซึ่งการรักษาโรคด้วยวิธีนี้จะมีโอกาสประสบความสำเร็จมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการประเมินล่วงหน้าโดยใช้องค์ความรู้ทางด้านการถ่ายเทความร้อนในเนื้อเยื่อเป็นสำคัญ จะเห็นได้ว่า ความแม่นยำของแบบจำลองทางความร้อนนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อผลสำเร็จของการรักษาโรคโดยใช้ความร้อน

เทคนิคการรักษาโรคโดยใช้ความร้อน

การรักษาโดยเทคนิคการให้ความร้อนประสบผลสำเร็จเป็นอย่างสูงในการรักษาโรคมะเร็ง ซึ่งเทคนิคในการรักษามะเร็งด้วยวิธีนี้จะทำการให้ความร้อนแก่เนื้อเยื่อด้วยอุณหภูมิที่สามารถทำให้เซลล์มะเร็งตายได้ (ที่อุณหภูมิสูงกว่า 50^{o}C) โดยที่ความร้อนที่ให้ไปนี้จะต้องไม่ทำอันตรายแก่เนื้อเยื่อที่ดี โดยทั่วไปการรักษาโรคโดยใช้ความร้อนนี้จะใช้เทคนิคการยิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังก้อนมะเร็งโดยตรง การควบคุมการกระจายอุณหภูมิให้เหมาะสมจะส่งผลต่อการรักษาเป็นอย่างมาก ในเชิงคลินิก ความสำเร็จในการรักษาพิจารณาจากปริมาตรของเซลล์เนื้องอกที่ถูกทำลายเป็นตัวบ่งชี้ และต้องควบคุมไม่ให้ความร้อนที่ให้แก่เซลล์เนื้องอกไปทำอันตรายแก่เนื้อเยื่อที่ดีได้ เนื่องจากร่างกายมนุษย์มีกลไกการถ่ายเทความร้อนที่ซับซ้อน หากให้ความร้อนแก่เนื้อเยื่อในปริมาณที่ไม่เหมาะสม อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่คนไข้ได้ เช่น เกิดความร้อนสูงเกินไปในบริเวณที่ไม่ต้องการทำลาย หรือการเกิดจุดร้อน และการไหม้ของเนื้อเยื่อได้

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอในเนื้อเยื่อเกิดจากเส้นเลือดใหญ่ที่ไหลผ่านบริเวณที่ต้องการทำความร้อนพาความร้อนออกไปจากเนื้อเยื่อในบริเวณนั้นด้วยซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสัมฤทธิผลในการรักษา ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่จ่ายความร้อนไปยังบริเวณที่ต้องการรักษา ทั้งการศึกษาในเชิงทฤษฎี การทดลอง และการศึกษาในทางคลินิก ในทางกระบวนการควบคุมการจ่ายความร้อนให้แก่เนื้อเยื่อ มีความจำเป็นต้องทราบการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิในบริเวณที่ต้องการรักษาเพื่อป้อนพลังงานไปยังตำแหน่งที่ต้องการรักษาได้อย่างเหมาะสมและป้องกันอันตรายจากความร้อนที่จะเกิดกับเนื้อเยื่อดี จากความจำเป็นที่ต้องทราบการกระจายตัวเชิงอุณหภูมิของเนื้อเยื่อในบริเวณที่ทำการรักษาอย่างถูกต้องได้มีศึกษาโดยการจำลองและการทดลองจำนวนมากเพื่อใช้

ในการคำนวณอุณหภูมิของเนื้อเยื่อโดยใช้สมการไบโอฮีท (bioheat equation)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเนื้อเยื่อที่มีเลือดไหลเวียน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเนื้อเยื่อชีวภาพนิยมใช้สมการไบโอฮีทซึ่งเสนอไว้โดย Pennes (1998) สมการไบโอฮีทนี้ประกอบไปด้วยพจน์การนำความร้อนของเนื้อเยื่อ พจน์การพาความร้อนเนื่องจากการไหลเวียนของเลือด และพจน์ของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสันดาปของเนื้อเยื่อ ตัวอย่างการนำสมการไบโอฮีทไปใช้งานที่สำคัญตัวอย่างหนึ่งคือ การนำสมการนี้ไปใช้ในการประเมินความเสี่ยงเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสัญญาณของโทรศัพท์มือถือและสถานีส่งสัญญาณ ที่มีผลให้อุณหภูมิของร่างกายสูงขึ้นจากการสัมผัสคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าที่มีต่อร่างกายของมนุษย์ได้

สมการไบโอฮีท

ในสมัยก่อนแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในร่างกายมนุษย์ของ Pennes (1998) ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในแขนมนุษย์ แต่ด้วยความง่ายของมัน (เนื่องจากสมมุติให้ค่าการนำความร้อน การไหลเวียนเลือด และอัตราการสันดาปของเนื้อเยื่อมีความสม่ำเสมอ) จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานวิจัยต่าง ๆ เช่น การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการรักษาโรคมะเร็งโดยใช้ความร้อน ซึ่งสมการไบโอฮีทของ Pennes (1998) แสดงในรูปแบบที่เข้าใจได้ง่ายดังนี้

$$(\rho c_p)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = \nabla\cdot(k_t \nabla T_t)+q_p+q_m \qquad (1)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของเนื้อเยื่อ

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อ

T_t คือ อุณหภูมิของเนื้อเยื่อ

k_t คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของเนื้อเยื่อ และ

q_m คือ อัตราการกำเนิดพลังงานต่อปริมาตรจากการสันดาปของเนื้อเยื่อ

ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเลือดไปสู่เนื้อเยื่อ q_p สมมุติให้เป็นสัดส่วนกับผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิเลือดไหลเข้าและไหลออกจากเนื้อเยื่อ ซึ่งสามารถกำหนดได้เป็น

$$q_p=\omega\rho_b c_b(T_{a,in}-T_{v,out}) \qquad (2)$$

โดยที่ $T_{a,in}$ คือ อุณหภูมิของเลือดที่ไหลเข้าสู่เนื้อเยื่อ

$T_{v,out}$ คือ อุณหภูมิของเลือดที่ไหลออกจากเนื้อเยื่อผ่านระบบเส้นเลือดและเส้นเลือดฝอย

ρ_b คือ ความหนาแน่นของเลือด

c_b คือ ค่าความร้อนจำเพาะของเลือด

ω คือ อัตราการไหลเวียนของเลือดโดยปริมาตรเทียบกับปริมาตรของเนื้อเยื่อ

โดยสมมุติให้ระบบเส้นเลือดในเนื้อเยื่อและเนื้อเยื่อมีความสมดุลเชิงอุณหภูมิซึ่งกันและกัน ($T_{v,out}=T_t$) จึงเขียนพจน์ของการถ่ายเทความร้อนจากการไหลเวียนของเลือดได้เป็น

$$q_p=\omega\rho_b c_b(T_{a,in}-T_t) \qquad (3)$$

สรุป

การรักษาโรคด้วยความร้อนกำลังเป็นที่ได้รับความนิยมในวงการแพทย์ การจำลองการถ่ายเทความร้อนในเนื้อเยื่อที่ทำการรักษาโดยใช้คอมพิวเตอร์จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อการรักษาที่ถูกต้อง ปลอดภัย เหมาะสม และมีผลกระทบน้อยที่สุด ปัจจุบันการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเนื้อเยื่อนิยมใช้สมการไบโอฮีท ซึ่งสามารถทำนายการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณเนื้อเยื่อได้ดีกว่าสมการความร้อนแบบปกติ เนื่องจากนำผลของการไหลเวียนโลหิตและความร้อนจากกระบวนการหายใจมาพิจารณาร่วมด้วย นอกจากนี้การเลือกใช้ค่าสมบัติทางความร้อนที่ถูกต้องเป็นสิ่งที่ควรตระหนักในการจำลองทางความร้อนเพื่อการจำลองรักษาโรคที่มีความแม่นยำสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

พรทิพย์ แก่งอินทร์ ธีรพจน์ เวศพันธุ์ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2552). การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยจำลองการรักษาเซลล์มะเร็งตับโดยใช้คลื่นไมโครเวฟผ่านท่อนำคลื่น, **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23**, 4-7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่.

Pennes, H. H. (1998). Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. **J. Appl. Physiol**. 85: 5-34.

Shen, W., Zhang, J., and Yang, F. (2005). Three-dimensional model on thermal response of skin subject to laser heating. **Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.** 8(2): 115-125.

Shi, J., Chen, Z., and Shi, M. (2009). Simulation of heat transfer of biological tissue during cryosurgery based on vascular trees. **Appl. Thermal Engin.** 29: 1792-1798.

Yang, D., Converse, M. C., Mahvi, D. M., and Webster, J. G. (2007). Expanding the bioheat equation to include tissue internal water evaporation during heating. **IEEE Trans. Biomed. Engin.** 54(8): 1382-1388.