กระดูกบางจากการปฏิบัติงานในเรือดำน้ำ

นรัตถพล เจริญพันธุ์[๑,๒]

[๑] ภาควิชาสรีรวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ และสถาบันชีววิทยาศาสตร์โมเลกุล มหาวิทยาลัยมหิดล

[๒] ภาคีสมาชิก สาขาวิชาสรีรวิทยา ประเภทวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตสภา, narattaphol.cha@mahidol.ac.th

บทนำ

กระดูกของมนุษย์ปรับตัวให้เหมาะสมแก่การใช้ชีวิตบนพื้นดินใกล้ระดับน้ำทะเล จะเกิดอะไรขึ้นหากมนุษย์ต้องปฏิบัติงานหรืออาศัยอยู่ในพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมเปลี่ยนไปอย่างมาก เช่น อยู่ในเรือดำน้ำเป็นเวลานานหลายสัปดาห์หรือเป็นเดือน ภายในเรือดำน้ำมีพื้นที่จำกัด ตลอดจนความเข้มข้นของแก๊สที่ต่างไปจากปรกติ กระทบต่อการทำงานของร่างกายหลายระบบ เช่น การหายใจ แต่ที่ยังไม่มีข้อสรุปแน่ชัดคือ การปฏิบัติงานในเรือดำน้ำจะเป็นเหตุให้มวลกระดูกลดลงจนเกิดภาวะกระดูกบางหรือโรคกระดูกพรุนได้หรือไม่

ข้อมูลจากการศึกษากระดูกของผู้ปฏิบัติงานในเรือดำน้ำ

ในปี ค.ศ. ๒๐๑๐ นักวิจัยจากรัฐอิสราเอลศึกษาผู้ปฏิบัติงานในเรือดำน้ำจำนวน ๓๒ คน (Luria et al., 2010) ทั้งหมดเป็นผู้ชายอายุราว ๒๐–๒๕ ปี สุขภาพแข็งแรง ออกกำลังกายสม่ำเสมอ แรงกระแทกและแรงดึงที่เกิดจากการออกกำลังและการหดตัวของกล้ามเนื้อกระตุ้นการสร้างกระดูกที่ดี หลังจากทำงานในเรือดำน้ำใช้เครื่องดีเซลไฟฟ้า เป็นเรือประเภทดอลฟิน (Dolphin class) ๓๐ วัน จากการตรวจด้วยคลื่นเหนือเสียง พบว่ากระดูกแข้งของอาสาสมัครมีความผิดปรกติ โดยมีมวลกระดูกลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า ตัวบ่งชี้ทางชีวภาพที่แสดงการสร้างกระดูกและการสลายกระดูกมีค่าลดลงด้วย ซึ่งเป็นความผิดปรกติของระบบความคุมวัฏจักรการสร้าง–สลายกระดูก อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคและสมบัติทางฟิสิกส์ของกระดูกด้วยเทคนิคขั้นสูง เช่น การกราดภาพตัดขวางเพื่อศึกษาโครงสร้างสามมิติ หรือการวัดความแข็งด้วยไมโครอินเดนเทชัน แม้ว่าจะมีงานวิจัยอีกหลายเรื่องที่ศึกษาเมแทบอลิซึมของแคลเซียมและกระดูกของผู้ปฏิบัติงานในเรือดำน้ำ แต่ก็มักจำกัดอยู่เพียงการตรวจวัดระดับฮอร์โมนที่ควบคุมสมดุลแคลเซียม หรือตัวบ่งชี้ทางชีวภาพที่เป็นตัวแทนของวัฏจักรการสลายและสร้างกระดูก

ตัวบ่งชี้ทางชีวภาพแสดงเมแทบอลิซึมของแคลเซียมและกระดูกที่เปลี่ยนแปลง

สมดุลแคลเซียมของร่างกายควบคุมโดย ๓ อวัยวะหลัก ได้แก่ ลำไส้ ไต และกระดูก อย่างไรก็ตาม ตั้งแต่ปี ค.ศ. ๑๙๘๐ จวบจนถึงปัจจุบัน งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาเมแทบอลิซึมของแคลเซียมและกระดูกของผู้ที่ปฏิบัติงานในเรือดำน้ำไม่ได้วัดอัตราการขนส่งแคลเซียมผ่านเยื่อบุผิวลำไส้หรือหลอดไตฝอยโดยตรง แต่

งานวิจัยที่ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของกระดูกอย่างเป็นระบบมีน้อย ส่วนใหญ่ใช้ตัวบ่งชี้ทางชีวภาพที่ตรวจพบได้ในเลือดของอาสาสมัคร แสดงสมดุลแคลเซียมที่เปลี่ยนแปลงไป

ในปี ค.ศ. ๑๙๘๒ มีรายงานผลการศึกษาอาสาสมัคร ๓๐ คน (Gilman et al., 1982) ซึ่งปฏิบัติงานในเรือดำน้ำนาน ๒ เดือน พบว่าประมาณร้อยละ ๓๐ มีระดับ ๒๕-ไฮดรอกซีวิตามินดี (แคลซิไดออล) ต่ำในเลือด แต่กลับมีระดับแคลเซียมในเลือดสูงกว่าปรกติ แม้ว่าระดับ ๒๕-ไฮดรอกซีวิตามินดีที่ต่ำลงน่าจะทำให้เกิดภาวะเลือดมีแคลเซียมต่ำหรือในบางกรณีก็อาจไม่กระทบกับระดับแคลเซียมในเลือดมากนัก ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายด้วยความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ที่มักสูงขึ้นในพื้นที่ปิดหรือระบายอากาศไม่ดี เช่น ในเรือดำน้ำ นอกจากนี้มีงานวิจัยในปี ค.ศ. ๒๐๐๕ มีรายงานว่า ผู้ปฏิบัติงานในเรือดำน้ำ ๒๖ คน ซึ่งได้รับการเสริมวิตามินดี ๔๐๐ หน่วยสากลต่อวัน ก็ไม่อาจช่วยเพิ่มระดับ ๒๕-ไฮดรอกซีวิตามินดี ได้มากนัก (Duplessis et al., 2005)

จากการตรวจวัดตัวบ่งชี้ทางชีวภาพของวัฏจักรการสร้างและสลายกระดูก พบว่า ผู้ที่ปฏิบัติงานในเรือดำน้ำมีระดับ N-terminal procollagen peptide (ตัวบ่งชี้การสร้างกระดูก) ตลอดจน tartrate-resistant acid phosphatase และ type 1 carboxy-terminal telopeptide (ตัวบ่งชี้การสลายกระดูก) ลดลง (Luria et al., 2010) แสดงว่า การปฏิบัติงานในเรือดำน้ำทำให้ทั้งการสร้างและสลายกระดูกลดลง ตัวบ่งชี้ทางชีวภาพทั้ง ๓ ชนิดดังกล่าวนิยมใช้เป็นตัวแทนการทำงานของเซลล์สร้างกระดูกและเซลล์สลายกระดูก ทั้งในสัตว์ทดลองและมนุษย์ แต่ก็ยังไม่สามารถทดแทนการตรวจโครงสร้างของกระดูกด้วยเทคนิคเอกซเรย์สามมิติได้ ดังนั้นจึงยังไม่อาจสรุปได้แน่ชัดว่า โครงสร้างระดับจุลภาคหรือระดับนาโนของกระดูกจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อต้องปฏิบัติงานในเรือดำน้ำเป็นเวลานานนับเดือน

กลวิธานการเสื่อมของกระดูก

จากการที่ไม่มีข้อสรุปที่ชัดเจนว่าการปฏิบัติงานในเรือดำน้ำทำให้โครงสร้างของกระดูกเสื่อมลงถาวรจริงหรือไม่ กลวิธานที่เป็นไปได้แสดงในภาพที่ 1 จากรายงานปี ค.ศ. ๒๐๑๐ ของนักวิจัยจากรัฐอิสราเอลพบว่าหากหยุดปฏิบัติงานในเรือดำน้ำ มวลกระดูกจะกลับมาเท่าเดิมในเวลาเพียง ๖ เดือน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ สภาพภายในเรือดำน้ำไม่น่าจะส่งผลเสียระยะยาวต่อกระดูก สามารถซ่อมแซมตัวเองจนกลับมาเป็นปรกติเมื่อกลับมาอยู่บนบก

คำถามสำคัญในเชิงสรีรวิทยาคือ สภาพหรือปัจจัยอะไรภายในเรือดำน้ำทำให้เกิดความผิดปรกติของสมดุลแคลเซียมและกระดูก ปัจจัยหลักน่าจะเป็นความเข้มข้นหรือความดันย่อยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บรรยากาศปรกติที่เราหายใจมีแก๊สชนิดนี้อยู่ราว ๔๒๐ พีพีเอ็ม หรือประมาณร้อยละ ๐.๐๔ ของปริมาณแก๊สทั้งหมดในอากาศ แต่ในเรือดำน้ำอาจมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นถึงร้อยละ ๑.๒ (ราว ๓๐ เท่า) ซึ่งน่าจะกระทบต่อสมดุลกรดเบสของร่างกาย ผู้นิพนธ์เคยศึกษาผลของภาวะกรดต่อการดูดซึมแคลเซียมที่ลำไส้และโครงสร้างของกระดูกในสัตว์ทดลองขนาดเล็ก เช่น หนูขาว พบว่าภาวะกรดลดอัตราการดูดซึมแคลเซียมของลำไส้ (Charoenphandhu et al., 2006) ลดการทำงานของเซลล์สร้างกระดูก และยังเพิ่มการทำงานของเซลล์สลายกระดูก (Assapun et al., 2009) ซึ่งทำให้มวลกระดูกลดลงมาก อย่างไรก็ตาม ผู้ปฏิบัติงานในเรือ

ดำน้ำน่าจะสลายกระดูกลดลงด้วย การเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงไม่น่าเป็นปัจจัยเดียวที่ทำให้กระดูกผิดปรกติ

ภาพที่ 1 สรุปกลวิธานการเสื่อมของกระดูก มวลกระดูกของผู้ปฏิบัติงานในเรือดำน้ำลดลงจากหลายสาเหตุ เช่น ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในสิ่งแวดล้อมสูงขึ้น ไม่มีแสงแดดทำให้ขาดวิตามินดี พื้นที่จำกัดทำให้เคลื่อนไหวร่างกายได้น้อยลง ความเครียดเพิ่มขึ้นและวิตกกังวลจากการปฏิบัติงานที่ยาก ซับซ้อน อันตราย และกดดันสูง (เนื้อหาโดย : ศาสตราจารย์ ดร. นพ.นรัตถพล เจริญพันธุ์; ภาพประกอบโดย : นางสาวฐิตาภา เกียรติศิริชัย)

อีกปัจจัยหนึ่งคือ ภายในเรือดำน้ำไม่มีแสงอาทิตย์หรือแสงที่มีความยาวคลื่นเหมาะสม เป็นที่ทราบกันดีว่า รังสีเหนือม่วงชนิดบี (ความยาวคลื่น ๒๙๐–๓๑๕ นาโนเมตร) จากแสงอาทิตย์ ช่วยให้เซลล์ผิวหนังสร้างวิตามินดี ซึ่งเปลี่ยนรูปไปเป็น ๒๕-ไฮดรอกซีวิตามินดี โดยอาศัยเอนไซม์จากเนื้อเยื่ออื่น ๆ เช่น ตับ เมื่อร่างกายเสียสมดุลแคลเซียม มักมีการเปลี่ยน ๒๕-ไฮดรอกซีวิตามินดี ไปเป็น ๑,๒๕-ไดไฮดรอกซีวิตามินดี ซึ่งทำหน้าที่

เป็นฮอร์โมนกระตุ้นการดูดซึมแคลเซียมที่ลำไส้ และยังช่วยให้เซลล์สลายกระดูกทำงานเป็นปรกติ ดังนั้นระดับ ๒๕-ไฮดรอกซีวิตามินดี ซึ่งลดต่ำลงจึงอธิบายความผิดปรกติของเซลล์สลายกระดูกได้บางส่วน

ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลเสียต่อเซลล์สร้างกระดูกและเซลล์สลายกระดูก แต่ยังไม่มีหลักฐานโดยตรงที่ยืนยันสมมติฐานเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น การบริโภควิตามินดีหรือวิตามินซีไม่เพียงพอด้วยเหตุข้อจำกัดเรื่องอาหาร วิตามินทั้งสองชนิดจำเป็นต่อการสร้างกระดูก โดยวิตามินดีทำให้เซลล์สร้างกระดูกเจริญได้ดี ส่วนวิตามินซีช่วยเรื่องการสร้างโปรตีนคอลลาเจนและการจัดเรียงใยคอลลาเจนให้เป็นระเบียบ หากขาดวิตามินทั้งสองชนิดก็ย่อมทำให้การสร้างกระดูกผิดปรกติ การใช้ชีวิตอยู่ในที่แคบ เคลื่อนไหวร่างกายได้ลำบาก ขาดการออกกำลังกายที่จำเป็น ล้วนส่งผลเสียต่อกระดูก เนื่องจากเซลล์ของกระดูกชนิดออสทิโอไซต์ทำหน้าที่เป็นตัวรับเชิงกล หากเคลื่อนไหวร่างกายได้น้อยลงหรือขาดการออกกำลังกายจะทำให้สัญญาณกล (เช่น แรงและความดัน) ส่งมากระตุ้นออสทิโอไซต์ลดลงด้วย ออสทิโอไซต์จึงอาจปรับการทำงานโดยสร้างโปรตีนที่ลดการสร้างกระดูก นอกจากนี้ กล้ามเนื้อที่ขาดการเคลื่อนไหวก็อาจสร้างสารประเภทไมโอไคน์ลดลง ซึ่งมีไมโอไคน์หลายชนิด เช่น อิริซิน ที่ควบคุมการสร้างกระดูกให้สมดุลกับการเคลื่อนไหวร่างกาย

มีความเป็นไปได้ว่า การใช้ชีวิตในสภาพความเครียดทางอารมณ์สูง เช่น พื้นที่คับแคบ เสี่ยงภยันตรายถึงแก่ชีวิต ขาดปฏิสัมพันธ์กับบุคคลใกล้ชิด นอนน้อย อาจเพิ่มระดับคอร์ทิซอลในเลือด ทั้งนี้เป็นที่ทราบดีว่าคอร์ทิซอลเป็นฮอร์โมนความเครียดที่ทั้งดีและไม่ดีต่อกระดูก ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นในเลือด เซลล์สร้างกระดูกต้องการคอร์ทิซอลปริมาณน้อย ๆ เพื่อกระตุ้นให้เซลล์เจริญเป็นเซลล์เต็มวัย แต่ถ้าคอร์ทิซอลเพิ่มสูงเกินจำเป็น จะกดการทำงานของเซลล์สร้างกระดูกและกระตุ้นเซลล์สลายกระดูก ทำให้เกิดโรคกระดูกพรุนได้ ภาวะเลือดมีคอร์ทิซอลสูงพบได้เสมอในผู้ปฏิบัติการแนวหน้า รวมถึงในเรือดำน้ำด้วย (Reini, 2010) ดังนั้นระดับคอร์ทิซอลสูงในเลือดจึงน่าจะมีส่วนทำให้มวลกระดูกลดลงระหว่างปฏิบัติหน้าที่ในเรือดำน้ำ อนึ่ง งานวิจัยในสัตว์ทดลองยืนยันว่า ความเครียดเรื้อรังทำให้มวลกระดูกลดลง (Lertsinthai et al., 2015) ซึ่งเป็นผลจากความผิดปรกติของระบบประสาทอัตโนวัติ และการสร้างคอร์ทิซอลที่มากเกินพอดี

การประยุกต์ใช้ข้อมูลวิจัยในสภาพพิเศษ

ความรู้จากงานวิจัยในเรือดำน้ำสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสภาพแวดล้อมที่คล้ายกัน เช่น เป็นพื้นที่แคบหรืออับอากาศ ระดับคาร์บอนไดออกไซด์สูงหรือออกซิเจนต่ำ งานมีความเครียดสูง เสี่ยงภัย ไม่ว่าจะเป็นการปฏิบัติงานในยานสำรวจใต้น้ำ ทำงานในเหมืองใต้ดิน เป็นต้น ในอนาคตอาจมีการเดินทางในอวกาศ ซึ่งมนุษย์ต้องอาศัยอยู่ในยานอวกาศที่แคบ มีความดันย่อยของแก๊สหายใจต่างไปจากเดิม ตลอดจนสัมผัสกับรังสีหรือกัมมันตรังสีตลอดเวลา ระดับของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้นแม้เพียงเล็กน้อยอาจทำให้เกิดภาวะกรดขึ้นในเลือดและเนื้อเยื่อต่าง ๆ ก็อาจทำให้มวลกระดูกลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ การควบคุมความดันย่อยของแก๊สออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจน จึงสำคัญยิ่งต่อคุณภาพชีวิตและสุขภาพกระดูกของผู้ปฏิบัติงานในเรือดำน้ำ หรืออยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมทำนองเดียวกัน

จะเห็นได้ว่า ผู้ปฏิบัติงานในเรือดำน้ำอาจมีความเข้มข้นของแคลเซียมสูงในเลือดได้ ซึ่งยังไม่มีคำอธิบายชัดเจนว่าเกิดจากสาเหตุใด อาจเกิดจากการสลายแคลเซียมออกจากกระดูกตลอดเวลา แม้ว่าเซลล์

สลายกระดูกจะทำงานลดลง แต่หากทำงานต่อเนื่องโดยไม่มีช่วงหยุดทำงานเลย ก็ทำให้เสียแคลเซียมจากกระดูกได้ ความรู้นี้อาจนำไปต่อยอดเป็นคำถามวิจัยเพิ่มเติม เช่น หากบริโภคอาหารเสริมแคลเซียมจะช่วยให้กระดูกเสื่อมช้าลงหรือไม่ เยื่อบุผิวลำไส้และหลอดไตฝอยจะขนส่งแคลเซียมมากขึ้นหรือน้อยลงอย่างไร ฯลฯ หากมีข้อมูลชัดเจนในอนาคต ก็อาจนำไปสู่การพัฒนาอาหารเสริมสูตรใหม่ ๆ หรือการพัฒนายาที่ตอบโจทย์ผู้ปฏิบัติงานในลักษณะเดียวกันนี้

บทสรุป

การปฏิบัติงานในเรือดำน้ำเป็นเวลานานหลายเดือนไม่เพียงก่อให้เกิดโรคเครียด โรควิตกกังวล หรือทุพโภชนาการ แต่ยังส่งผลเสียต่อวัฏจักรการสลายและสร้างกระดูกอีกด้วย ทำให้มวลกระดูกลดลงต่อเนื่อง ความผิดปรกติของกระดูกน่าจะเกิดจากหลายปัจจัย เช่น ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพแวดล้อมสูงขึ้น กระทบต่อสมดุลกรดเบสของร่างกาย ซึ่งส่งผลเสียต่อเซลล์สร้างกระดูก อย่างไรก็ตาม มวลกระดูกที่ลดลงในระหว่างปฏิบัติงานไม่ใช่เรื่องน่ากังวล เนื่องจากมีผลการทดลองยืนยันชัดเจนว่ามวลกระดูกจะกลับมาเป็นปรกติเมื่อกลับขึ้นฝั่ง ที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาถึงผลระยะยาวของการปฏิบัติงานในเรือดำน้ำต่อกระดูก เช่น ไม่มีข้อมูลว่าการปฏิบัติงานส่งผลต่อค่ามวลกระดูกสูงสุดในช่วงอายุ ๓๐–๓๕ ปีหรือไม่ หากกระทบต่อมวลกระดูกสูงสุด เมื่ออายุมากขึ้นก็จะเสี่ยงเป็นโรคกระดูกพรุน หรือกระดูกหักง่ายขึ้นใช่หรือไม่ ซึ่งจะต้องติดตามอาสาสมัครนาน ๓๐–๔๐ ปี นอกจากนี้การศึกษาที่ผ่านมาไม่ได้วัดสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็ง มอดุลัสยืดหยุ่นโดยตรง ไม่มีการตรวจโครงสร้างของกระดูกในระดับจุลภาคหรือนาโน ตลอดจนไม่ได้ศึกษาลงลึกถึงระดับเซลล์และโมเลกุล จึงไม่มีข้อสรุปในเรื่องกลวิธานที่นำไปสู่ความผิดปรกติของกระดูก

เอกสารอ้างอิง

Assapun J, Charoenphandhu N, Krishnamra N. Early acceleration phase and late stationary phase of remodeling imbalance in long bones of male rats exposed to long-standing acidemia: a 10-month longitudinal study using bone histomorphometry. Calcif Tissue Int. 2009;85(1):1–9.

Charoenphandhu N, Tudpor K, Pulsook N, Krishnamra N. Chronic metabolic acidosis stimulated transcellular and solvent drag-induced calcium transport in the duodenum of female rats. Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol. 2006;291(3):G446–455.

Duplessis CA, Harris EB, Watenpaugh DE, Horn WG. Vitamin D supplementation in underway submariners. Aviat Space Environ Med. 2005;76(6):569–575.

Gilman SC, Biersner RJ, Bondi KR. Effect of a 68-day submarine patrol on serum 25-hydroxyvitamin D levels in healthy men. Int J Vitam Nutr Res. 1982;52(1):63–67.

Luria T, Matsliah Y, Adir Y, Josephy N, Moran DS, Evans RK, Abramovich A, Eliakim A, Nemet D. Effects of a prolonged submersion on bone strength and metabolism in young healthy submariners. Calcif Tissue Int. 2010;86(1):8–13.

Lertsinthai P, Charoenphandhu J, Suntornsaratoon P, Krishnamra N, Charoenphandhu N. Voluntary wheel running mitigates the stress-induced bone loss in ovariectomized rats. J Bone Miner Metab. 2015;33(3):261–269.

Reini SA. Hypercortisolism as a potential concern for submariners. Aviat Space Environ Med. 2010;81(12):1114–1122.