

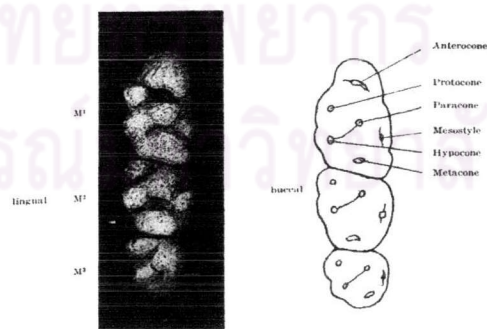
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะกายวิภาคศาสตร์ของฟันและขากรรไกรของหนูวิสตาร์ (Sicher and Weinmann, 1944)

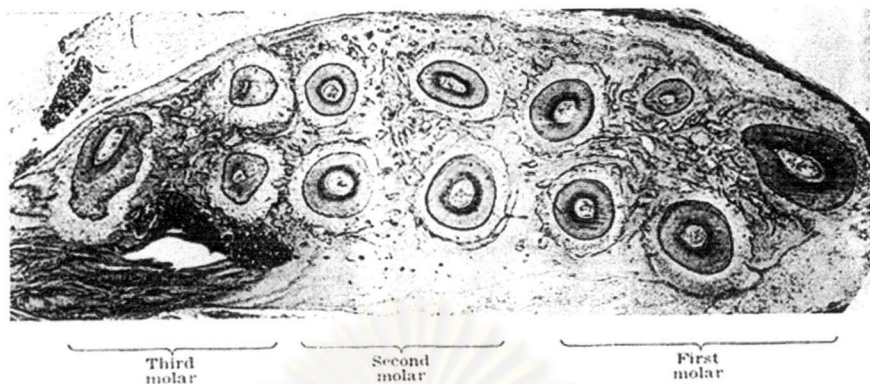
หนูวิสตาร์มีฟัน 4 ซี่ในขากรรไกรแต่ละข้าง (quadrant) ประกอบด้วย ฟันหน้าตัด 1 ซี่ และ ฟันกราม 3 ซี่ โดยที่ฟันกรามซี่ที่ 2 มักถูกนำมาเป็นต้นแบบในการบรรยายลักษณะรูปร่างฟันกรามของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

ในขากรรไกรบน ฟันกรามบนซี่ที่ 2 มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน มีปุ่มฟัน (cusp) 4 ปุ่มเรียงอยู่ที่มุมของรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน โดยปุ่มฟันด้านแก้มไกลกลาง (distobuccal cusp) มีขนาดใหญ่ที่สุด และมีสันตามขวาง (diagonal crest) เชื่อมระหว่างปุ่มฟันด้านแก้มใกล้กลาง (mesiobuccal cusp) และปุ่มฟันด้านลิ้นไกลกลาง (distolingual cusp) พบปุ่มฟันปุ่มที่ 5 ตั้งอยู่บริเวณขอบด้านแก้มระหว่างปุ่มฟันด้านแก้มใกล้กลาง (mesiobuccal cusp) และปุ่มฟันด้านแก้มไกลกลาง (distobuccal cusp) ฟันซี่นี้มี 4 ราก เป็นรากด้านแก้ม (buccal root) 2 ราก และด้านลิ้น (lingual root) 2 ราก โดยมีรากด้านลิ้นใกล้กลาง (mesiolingual root) มีขนาดใหญ่ที่สุด ตำแหน่งของรากฟันอยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยม ส่วนในฟันกรามซี่แรกมีขนาดใหญ่กว่าฟันกรามซี่ที่ 2 และสามารถสังเกตได้ง่าย โดยจะพบลอนรูปสามเหลี่ยมด้านใกล้กลาง (mesial triangular lobe) ฟันซี่นี้มี 5 ราก เป็นรากทางด้านแก้ม (buccal root) 3 ราก และรากด้านลิ้น (lingual root) 2 ราก โดยมีรากด้านแก้มใกล้กลาง (mesiobuccal root) มีขนาดใหญ่ที่สุด และในฟันกรามซี่ที่ 3 มีขนาดและรูปร่างเล็กกว่าฟันกรามซี่ที่ 2 ฟันซี่นี้มี 3 ราก เป็นรากด้านใกล้กลาง 2 ราก และด้านใกล้แก้มไกลกลาง 1 ราก ดังภาพที่ 6 และภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ลักษณะโครงสร้างฟันกรามบนด้านซ้ายในหนู (ดัดแปลงจาก Sicher and Weinmann. *Am J*

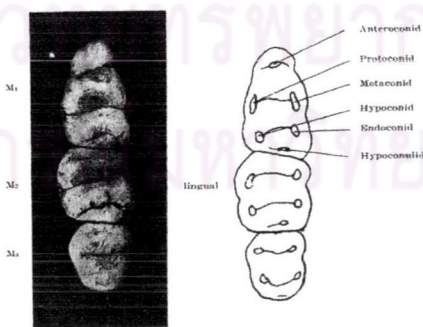
Orthod: p. 111, 1944)



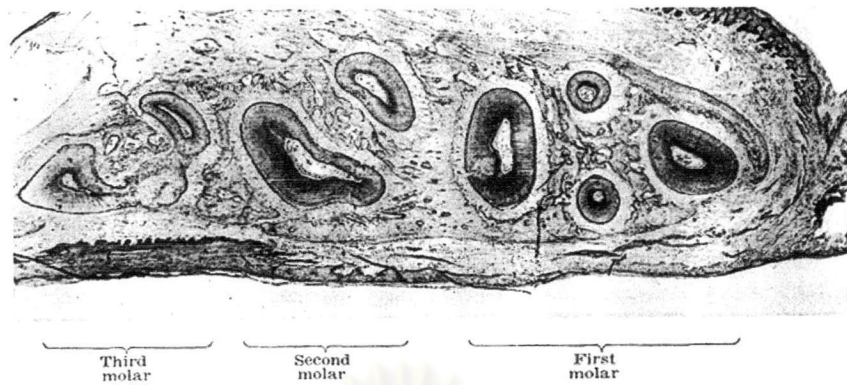
ภาพที่ 7 ภาคตัดขวางของรากฟันกรามบน (ดัดแปลงจาก Sicher and Weinmann. *Am J Orthod*: p.116, 1944)

ในฟันกรามบนอยู่เรียงชิดกันทั้ง 3 ซี่ (closed contact) และอยู่แยกห่างจากฟันหน้าตัดบน โดยมีช่องว่างขนาดใหญ่ (wide diastema) แนวแกนของตัวฟันเอียงไปในแนวไกลกลาง ความเอียงนี้ลดลงตามลำดับจากฟันกรามซี่แรกจนถึงซี่ที่ 3 และเอียงออกทางด้านใกล้แก้ม แนวแกนของรากฟันเอียงไปทางด้านใกล้กลางและแยกห่างจากกัน

ในขากรรไกรล่าง ฟันกรามล่างซี่ที่ 2 มี 2 หรือ 3 ราก ในกรณีที่มี 3 ราก รากที่มีขนาดใหญ่ที่สุดคือ รากด้านลิ้นไกลกลาง (distolingual root) รองลงมาคือ รากด้านแก้มใกล้กลาง (mesiobuccal root) และรากที่มีขนาดเล็กที่สุด คือ รากด้านใกล้ลิ้นใกล้กลาง (mesiolingual root) ในหนูส่วนใหญ่รากด้านใกล้ลิ้นทั้ง 2 รากมักจะรวมกัน (fuse) มีรูปร่างคล้ายรูปถั่ว ส่วนในฟันกรามล่างซี่แรกมี 4 ราก โดย 2 รากเป็นรากขนาดใหญ่ด้านใกล้กลางและไกลกลาง อีก 2 รากเป็นรากขนาดเล็กอยู่ระหว่าง 2 รากใหญ่ทางด้านใกล้แก้มและใกล้ลิ้น และในฟันกรามล่างซี่ที่ 3 มี 2 ราก ดังภาพที่ 8 และภาพที่ 9



ภาพที่ 8 ลักษณะโครงสร้างฟันกรามล่างด้านซ้ายในหนู (ดัดแปลงจาก Sicher and Weinmann. *Am J Orthod*: p.111, 1944)



ภาพที่ 9 ภาคตัดขวางของรากฟันกรามล่าง (ดัดแปลงจาก Sicher and Weinmann. *Am J Orthod* : p.116, 1944)

การเรียงตัวของแนวแกนฟันกรามล่างเฉียงไปทางด้านใกล้กลาง โดยความเฉียงเพิ่มขึ้นจากฟันกรามล่างซี่แรกถึงฟันกรามล่างซี่ที่ 3 และเฉียงเข้าทางด้านใกล้ลิ้น

ภายหลังจากการสร้างรากฟัน ความยาวของฟันกรามทั้งบนและล่างจะคงที่ เมื่อมีการสึกของด้านบดเคี้ยวของฟันกราม จะมีการทดแทนด้วยการพอกเพิ่มของเคลือบรากฟันบริเวณปลายรากฟัน

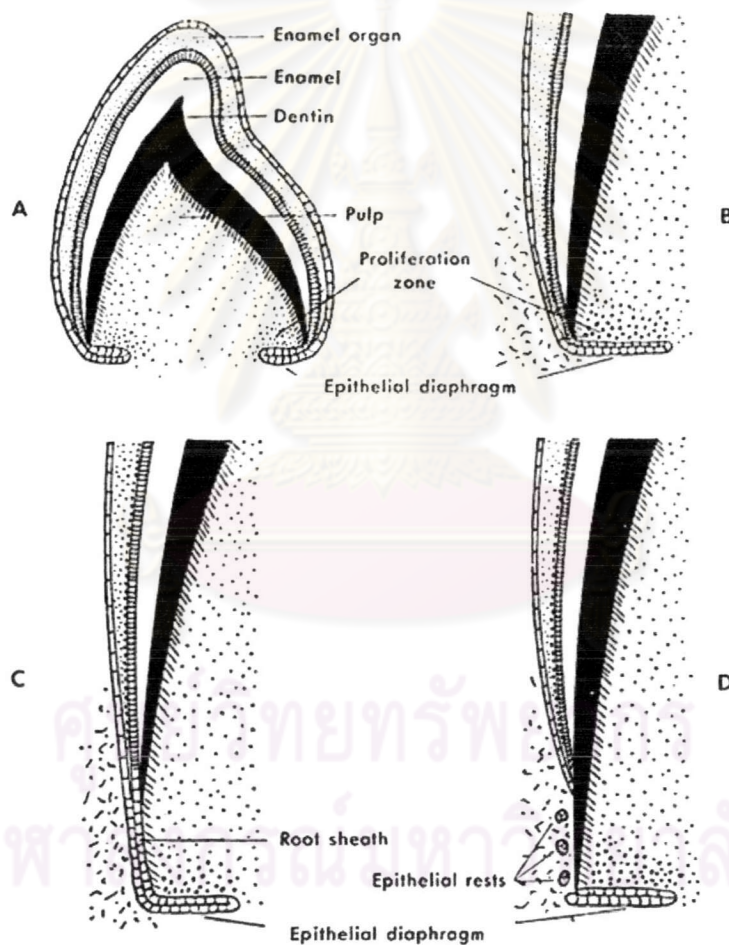
ฟันหน้าบนมีรูปร่างโค้ง ส่วนที่อยู่นอกกระดูกเบ้าฟันมีแนวโค้งไปทางด้านหลัง มีการสึกของปลายฟันในแนวโค้ง ส่วนของฟันที่อยู่ในขากรรไกรบน จะอยู่เหนือแผ่นกระดูกของเพดานแข็ง

ฟันหน้าล่างมีรูปร่างโค้ง แต่รัศมีของการโค้งมากกว่าฟันหน้าบน ส่วนที่อยู่นอกกระดูกเบ้าฟัน มีลักษณะยื่นไปทางด้านหน้าและโค้งขึ้นบน ส่วนที่อยู่ในกระดูกจะยื่นยาวอยู่ใต้ฟันกรามล่างทั้ง 3 ซี่ และไปสิ้นสุดบริเวณแรมัส (ramus) ของขากรรไกรล่าง

พัฒนาการสร้างรากฟัน (Sicher and Bhaskar, 1972; Salentijn and Klyvert, 1980; Bosshardt and Schroeder, 1996)

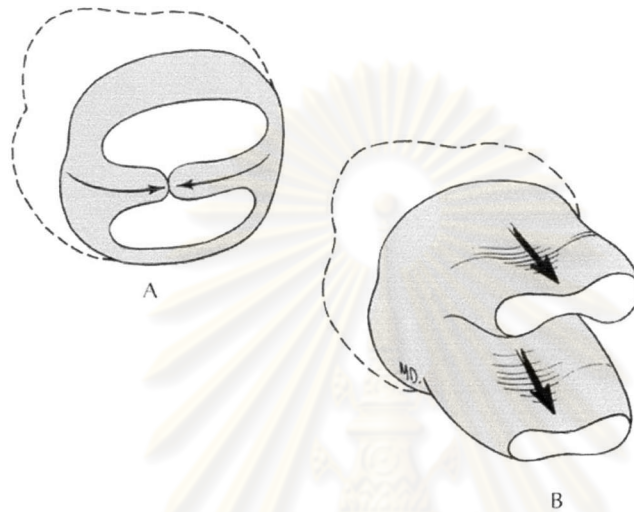
พัฒนาการสร้างรากฟันเริ่มเมื่ออวัยวะสร้างฟัน (enamel organ) กำหนดรูปร่างตัวฟันสมบูรณ์ และฟันเริ่มงอกขึ้นในช่องปาก (Eruptive movement) โดยเริ่มจากรอยต่อเคลือบฟันกับเคลือบรากฟัน (cementoenamel junction) ในระยะแรกการสร้างเคลือบรากฟันมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการสร้างเนื้อฟันบริเวณรากฟัน ทั้งนี้ในระหว่างการสร้างเนื้อฟันบริเวณตัวฟัน เซลล์จากปุ่มเนื้อกำเนิดฟัน (dental papilla) ถูกชักนำโดยเซลล์ด้านในของเยื่อบุผิวเคลือบฟัน (inner enamel epithelium) ให้เปลี่ยนเป็นเซลล์สร้างเนื้อฟัน (odontoblast) และถูกเหนี่ยวนำให้มีการแบ่งตัวอย่างต่อเนื่อง โดยเยื่อหุ้มรากเฮิร์ตวิก (Hertwig's epithelial root sheath) ซึ่งเยื่อหุ้มรากนี้ประกอบด้วยเซลล์ชั้นนอกและเซลล์ชั้นในของเยื่อบุผิวเคลือบฟัน เกิดการแบ่งตัวสร้างเป็น

เซอริคอลลูป (cervical loop) ส่วนปลายสุดของเยื่อหุ้มรากประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น เรียกว่า อีพิเธลิยม ไดอะแฟรม (epithelium diaphragm) ซึ่งแยกปุ่มเนื้อกำเนิดฟัน (dental papilla) จาก ถุงหุ้มหน่อฟัน (dental sac) เซลล์ที่มีกำเนิดจากปุ่มเนื้อกำเนิดฟันนี้เปลี่ยนเป็นเซลล์สร้างเนื้อฟัน และมีการสร้างเนื้อฟันที่รากฟันซึ่งจะเกิดตามหลังการเพิ่มความยาวของเยื่อหุ้มรากฟัน ในขณะที่เดียวกันเนื้อเยื่อยึดต่อ (connective tissue) ของถุงหุ้มหน่อฟันจะแบ่งตัวอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเซลล์ของเนื้อเยื่อยึดต่อจึงเคลื่อนเข้ามาสัมผัสกับส่วนนอกของเนื้อฟัน และเปลี่ยนเป็นเซลล์สร้างเคลือบรากฟัน (cementoblast) ซึ่งเป็นตัวสร้างชั้นของเคลือบรากฟันคลุมผิวเนื้อฟัน เมื่อเยื่อหุ้มรากขาดความต่อเนื่อง ส่วนที่เหลือจะคงอยู่เป็นเศษเยื่อหุ้มมาลาเซ (Epithelial rests of Malassez) ใน เอ็นยึดปริทันต์ (periodontal ligament) ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนภาพพัฒนาการสร้างรากฟัน: A แสดงส่วนของหน่อฟัน, B ภาพขยายส่วนคอฟัน, C และ D ภาพจินตนาการแสดงการยื่นยาวของเยื่อหุ้มรากเอิร์ตวิก (ดัดแปลงจาก Sicher and Bhaskar. *Orban's oral histology and embryology*: p.32, 1972)

ในพื้นที่มีหลายราก เยื่อหุ้มรากถูกแบ่งเป็น 2-3 รูเปิด โดยการเจริญในแนวขวาง (horizontal outgrowth) ของแผ่นเยื่อหุ้มฟันตัดผ่านรูเปิดบริเวณคอฟัน (cervical opening) การขยายของรูเปิดบริเวณคอฟันนี้ เกิดขึ้นในลักษณะยื่นยาวคล้ายลิ้น (long tongue-like extension) และมาเชื่อมกัน (fuse) ตรงกลางรูเปิดคอฟัน ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แผนภาพพัฒนาการของฟันหลายราก, A การเจริญของแผ่นเยื่อหุ้มฟันสร้างเป็นห้วงคอฟัน ในลักษณะยื่นยาวคล้ายลิ้น (long tongue-like extension) และมาเชื่อมกัน (fuse) ตรงกลางรูเปิดคอฟัน, B แยกเป็นรากฟัน 2 ราก (ดัดแปลงจาก Salentijn and Klyvert. *Dental and oral tissues – An introduction for paraprofessionals in dentistry*: p.184, 1980)

อัตราเฉลี่ยของความเร็วในการสร้างเนื้อฟันจากเนื้อฟันไปยังโพรงประสาทฟันของฟันกรามหนู อยู่ในช่วง 1.2-9.3 ไมโครเมตรต่อวัน (Hoffman and Schour, 1940a) ส่วนขบวนการสร้างเคลือบรากฟันเป็นขบวนการต่อเนื่อง เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใดๆ ก็ได้ของรากฟัน ระดับการพอกพูนของเคลือบรากฟันเพิ่มขึ้นตามอายุ โดยอัตราเร็วในการพอกพูนจะเกิดมากในสัตว์ที่มีอายุน้อย และอัตราเร็วในการพอกพูนจะลดลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้น (Peli and Oriez, 1999) นอกจากนี้ความกว้างของเคลือบรากฟันที่ด้านใกล้กลางจะมากกว่าด้านไกลกลาง เนื่องจากตามธรรมชาติฟันหนูจะเคลื่อนไปทางด้านไกลกลาง (distal migration) ภายใต้ระบบการบดเคี้ยวเมื่อฟันทำหน้าที่ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ระดับการพอกพูนของเคลือบรากฟันมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับผลที่ได้จากการเคลื่อนฟันตามธรรมชาติภายใต้ระบบการบดเคี้ยว ร่วมกับอายุที่เพิ่มขึ้น (Louridis Bazopoulou-Kyrkanidou and Demetriou, 1972) นอกจากนี้ฮอริโมนก็ยังส่งผลต่อการสร้าง

เคลือบรากฟัน โดยจากการศึกษาในหนูที่ได้รับการตัดต่อมใต้สมองซึ่งทำหน้าที่ผลิตฮอร์โมนเร่งการเจริญเติบโต (growth hormone) มีผลต่ออัตราการขึ้นของฟันหน้า และการสร้างเคลือบรากฟันที่ปลายรากของฟันกราม (Clayden et al., 1994) ซึ่ง Peli and Oriez, 1999 อ้างถึงการศึกษาของ Schroeder, 1986 ที่แสดงว่า ลักษณะของเคลือบรากฟันที่สร้างในหนู ครึ่งหนึ่งทางด้านตัวฟันถูกคลุมด้วยเคลือบรากฟันที่ไม่ได้ประกอบด้วยเซลล์ (acellular cementum) และครึ่งหนึ่งทางด้านปลายรากฟัน คลุมด้วยเคลือบรากฟันที่ประกอบด้วยเซลล์ (cellular cementum) และเป็นส่วนที่เพิ่มความหนาตามอายุ ดังนั้นเขาจึงทำการศึกษาวิธีการประเมินทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพของการพอกเพิ่มเนื้อเยื่อส่วนบริเวณปลายรากฟัน โดยการสะสมของเนื้อฟันและเคลือบรากฟันที่ป้องกันการพอกเพิ่มด้วยสารออกซีเตตราซัยคลิน (oxytetracycline) เปรียบเทียบระหว่างฟันหนูที่ยังไม่เจริญเต็มที่ (22-59 วัน) และฟันหนูที่มีการเจริญเต็มที่ (59-101 วัน) พบว่า มีการสะสมของเนื้อฟันและเคลือบรากฟันเกิดขึ้นทั้ง 2 ทิศทางคือ บริเวณปลายราก ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มความยาวรากฟัน ในกลุ่มที่ฟันยังไม่เจริญเต็มที่ ทำให้มีความยาวรากฟันเพิ่มขึ้นอัตรา 23.95 ไมครอน/ 24 ชั่วโมง ส่วนในกลุ่มที่ฟันเจริญเต็มที่ ทำให้มีความยาวรากฟันเพิ่มขึ้นอัตรา 8.23 ไมครอน/ 24 ชั่วโมง และบริเวณศูนย์กลางปลายราก เนื้อฟันมีการสะสมในแนวขนานกับแนวแกนรากฟัน จึงทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของเนื้อฟัน (dental diameter) แคบลง ส่วนการสะสมเคลือบรากฟันทำให้มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายรากเพิ่มขึ้นอัตรา 12.15 ไมครอน/ 24 ชั่วโมง ซึ่งการสะสมเคลือบรากฟันมีอัตราที่เร็วกว่าการสะสมของเนื้อฟัน และการสะสมด้านใกล้กลางสูงกว่าด้านไกลกลาง

การเคลื่อนที่ของฟันกรามตามธรรมชาติ

จากการศึกษาการเคลื่อนที่ฟันตามธรรมชาติในหนูวิสตา (Sicher and Weinmann, 1944) พบว่า ฟันกรามมีการงอกอย่างต่อเนื่องเพื่อชดเชยการสึกของฟัน ในขณะที่เดียวกันก็มีการเคลื่อนไปทางไกลกลางและด้านแก้มเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Miyoshi et al., 2001 พบว่า อัตราการเคลื่อนที่ฟันในหนูวิสตาในกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับแรงเคลื่อนที่เท่ากับ 0.02 ± 0.01 มิลลิเมตร ลักษณะภาคตัดขวางทางจุลกายวิภาค ที่ตัดผ่านบริเวณรากฟันกรามทั้ง 3 ซี่ พบว่า อัตราการเคลื่อนที่ฟันตามธรรมชาติเท่ากับอัตราการพอกเพิ่ม และปริมาณการเพิ่มขึ้นใหม่ของกระดูกงูฟันทางด้านใกล้กลาง ซึ่งบริเวณนี้พบว่าเอ็นยึดปริทันต์มีการเรียงตัวสม่ำเสมอเป็นปกติและแข็งแรง

ทางด้านไกลกลาง กระดูกงูฟันมีการละลายตัว แบ่งได้ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก มีการละลายตัวของกระดูกงูฟันโดยเซลล์ละลายกระดูก ต่อมาเส้นใยหลัก (principle fiber) ของเอ็นยึดปริทันต์สูญเสียการเรียงตัว และพบความผิดปกติของเนื้อเยื่อยึดต่อชนิดแน่น (dense

connective tissue) ชั้นตอนต่อมา บริเวณผิวกระดูกที่ถูกละลายมีการสร้างกระดูกใหม่เพิ่มขึ้นเป็นชั้นบางๆ และมีการเข้ายึดเกาะใหม่ของเส้นใยหลักเอ็นยึดปริทันต์กับผนังกระดูกเบ้าฟัน และในชั้นตอนสุดท้าย มีการพอกเพิ่มของกระดูกดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง จนไม่พบความแตกต่างระหว่างด้านใกล้กลางและด้านไกลกลางของเนื้อเยื่อปริทันต์

การเคลื่อนฟันตามธรรมชาติไปทางด้านไกลกลาง เกิดขึ้นเป็นช่วงๆ (intermittent period) ในช่วงที่พักจะเกิดการซ่อมแซมกระดูกที่ถูกละลาย เพื่อให้เกิดการยึดเกาะใหม่ของเอ็นยึดปริทันต์เป็นการปรับปรุงให้เกิดการทำหน้าที่ได้ปกติ ในชั้นตอนการเคลื่อนฟันตามธรรมชาติ อาจพบมีการละลายผิวเคลือบรากฟันหรือเนื้อฟันทางด้านไกลกลาง แต่จะมีการซ่อมสร้างเกิดขึ้นโดยการพอกเพิ่มของผิวเคลือบรากฟัน

จากการฉีดสารอะลิซาริน-เอส (alizarin-S) เป็นระยะๆ แล้วทำการศึกษาจากแผ่นชิ้นเนื้อที่ฝนจนบาง (ground section) เพื่อประเมินการพอกเพิ่มของกระดูกในแต่ละสัปดาห์ ซึ่งสัมพันธ์กับการเคลื่อนฟันตามธรรมชาติพบว่า ฟันกรามบนและล่างในหนูอายุน้อยมีอัตราการเคลื่อนฟันตามธรรมชาติไปทางด้านไกลกลางประมาณ 60-80 ไมโครเมตรต่อสัปดาห์ ในขณะที่หนูที่เจริญเติบโตเต็มที่ พบว่า ฟันกรามบนมีการเคลื่อนไปทางด้านไกลกลาง 7.7 ไมโครเมตรต่อวัน (King et al., 1991)

โดยสรุปจากการศึกษาการเคลื่อนฟันตามธรรมชาติของหนูวิสตาร์ โดยการศึกษาภาพรังสีและลักษณะทางจุลกายวิภาคศาสตร์ของหนูที่มีอายุต่างๆ กัน ตั้งแต่ 4 สัปดาห์ ถึง 1 ปี พบว่า

1. ฟันหน้าตัดมีการเจริญและงอกอย่างต่อเนื่อง ไม่เพียงแต่เป็นการขดเซยการสึกของฟันเท่านั้น แต่ยังเป็นการเจริญในทุกมิติของรูปร่างด้วย ทั้งในด้านปริมาตรและน้ำหนัก โดยเกิดขึ้นตลอดชีวิตของหนู
2. เมื่อหนูมีอายุ 1 สัปดาห์ จะปรากฏฟันกรามซี่แรก ภายหลังการงอกขึ้นสู่ช่องปาก ฟันซี่นั้นจะหยุดการเจริญเติบโต การงอกขึ้นในแนวตั้งของฟันกราม เป็นการขดเซยการสึกของฟัน และเพื่อให้สัมพันธ์กับการเจริญในแนวตั้งของขากรรไกร การเคลื่อนฟันกรามไปทางด้านไกลกลาง เพื่อให้สัมพันธ์กับการเจริญของขากรรไกรบนและขากรรไกรล่าง ในส่วนของความยาวที่เพิ่มขึ้นทางด้านหลัง โดยการพอกเพิ่มของกระดูกทางด้านใกล้กลางของผิวกระดูกเบ้าฟัน และการละลายของผิวกระดูกเบ้าฟันทางด้านไกลกลาง
3. ความสัมพันธ์ของตำแหน่งระหว่างฟันหน้าตัดและฟันกรามมีความคงที่ และมีการเจริญของขากรรไกรตลอดชีวิต
4. ในขบวนการสร้างกระดูกเบ้าฟันของฟันหน้าบนเกิดจากกระดูกขากรรไกรบนส่วนหน้า (premaxilla) และกระดูกขากรรไกรบน (maxilla)

การตอบสนองของฟันและอวัยวะปริทันต์เมื่อได้รับแรงทางทันตกรรมจัดฟัน

จากการสังเกตผลการเคลื่อนฟันภายหลังการให้แรงทางทันตกรรมจัดฟัน พบว่าปฏิกิริยาเริ่มต้นที่เกิดขึ้นกับกระดูกเบ้าฟันมีรูปแบบเหมือนกัน แม้จะได้รับแรงขนาดต่างกัน คือ ภายหลังได้รับแรงเคลื่อนฟัน จะเกิดการละลายของกระดูกเบ้าฟันทางด้านกดติดตามด้วยการสร้างกระดูกทางด้านดึง รูปแบบการเคลื่อนฟัน (Bridges, King and Mohammed, 1988) แบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ คือ ระยะแรก เกิดขึ้นทันทีที่ฟันได้รับแรงและเกิดต่อเนื่องไปอีก 2-3 วัน โดยฟันจะเคลื่อนตัวอย่างรวดเร็วในระยะทางสั้นๆ ของช่องเอ็นยึดปริทันต์ ซึ่งอาศัยคุณสมบัติวิสกอลัสติก (viscoelastic) ของเนื้อเยื่อ จากนั้นฟันจะหยุดเคลื่อน โดยพบการเปลี่ยนแปลงของอวัยวะปริทันต์ ได้แก่ ความกว้างของช่องเอ็นยึดปริทันต์บริเวณด้านกดจะแคบลง ซึ่งมีการศึกษาที่สนับสนุนการค้นพบดังกล่าว ได้แก่การศึกษาของ Zaki and Van Huysen, 1963 โดยให้แรงจากแผ่นยางกั้นน้ำลายกว้าง 2 มิลลิเมตร หนา 0.14 มิลลิเมตร ใส่ระหว่างฟันกรามซี่แรกและซี่ที่สองในขากรรไกรบน สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางด้านกดได้ตั้งแต่ภายหลังการให้แรง 6 ชั่วโมง นอกจากนี้ จะพบผิวกระดูกเบ้าฟันเริ่มเป็นแอ่งไม่เรียบ มีหลอดเลือดเพิ่มขึ้นและพบเซลล์สลายกระดูกมากขึ้น ส่วนในด้านดึงช่องเอ็นยึดปริทันต์กว้างขึ้น ผิวกระดูกเบ้าฟันส่วนใหญ่มีขอบเรียบ มีหลอดเลือดเพิ่มขึ้นเช่นกันและพบเซลล์สร้างกระดูกอยู่โดยทั่วไป

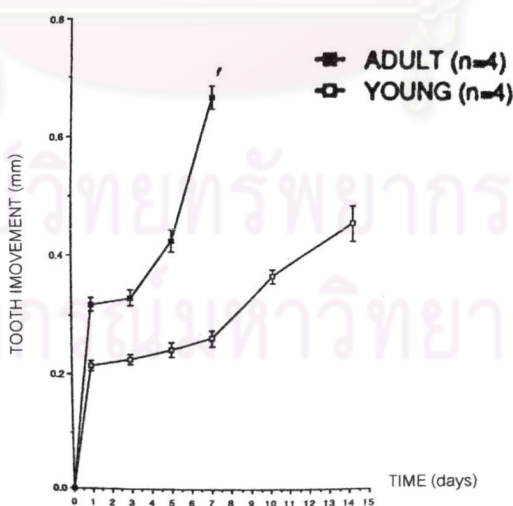
ต่อมาในระยะที่สอง (the delayed period) เป็นช่วงที่ฟันเคลื่อนที่น้อยมาก หรือไม่มีการเคลื่อนที่เลย ในระยะนี้จะเกิดการละลายกระดูกโดยตรง (direct bone resorption) กล่าวคือ เริ่มมีการละลายจากผิวกระดูกเบ้าฟันซึ่งอยู่ติดกับเอ็นยึดปริทันต์ ใช้เวลาสั้นๆ 3-5 วัน

ส่วนระยะที่สาม ฟันจะเคลื่อนตัวไปตามช่องว่างขนาดเล็กที่เกิดจากการละลายกระดูกโดยตรง ฟันจะเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องที่ละน้อยด้วยอัตราเร็วคงที่ ลักษณะทางจุลกายวิภาคพบว่า ช่องเอ็นยึดปริทันต์ทางด้านกดและด้านดึงมีความใกล้เคียงกัน ที่ผิวกระดูกเบ้าฟันพบเซลล์สลายกระดูกได้น้อย แต่พบเซลล์สร้างกระดูกน้อยอยู่ทั่วไป

ในการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอวัยวะปริทันต์ จะปรากฏชัดเจนในวันที่ 3-9 จากนั้นการเปลี่ยนแปลงจะลดลง จากหลายการศึกษา (Waldo and Rothblatt, 1954; Zaki and Van Huysen, 1963; Azuma, 1970) พบลักษณะการทำลายอย่างรุนแรงจนเกิดการตายชนิดไม่ติดเชื้อหรือไฮยาลิไนเซชัน (hyalinization) เกือบทุกช่วงเวลาของการให้แรงเคลื่อนฟัน กล่าวคือ เซลล์และหลอดเลือดถูกทำลายไปหมด จนมีลักษณะใสคล้ายกระจก บริเวณนั้นจะไม่มีการสร้างเซลล์สลายกระดูก จึงไม่เกิดการละลายกระดูกโดยตรง ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดของแรงที่ใช้ แรงมากจะทำให้เกิดไฮยาลิไนเซชันได้มากกว่าแรงน้อย และทำให้การสร้างกระดูกเกิดได้ช้าลง

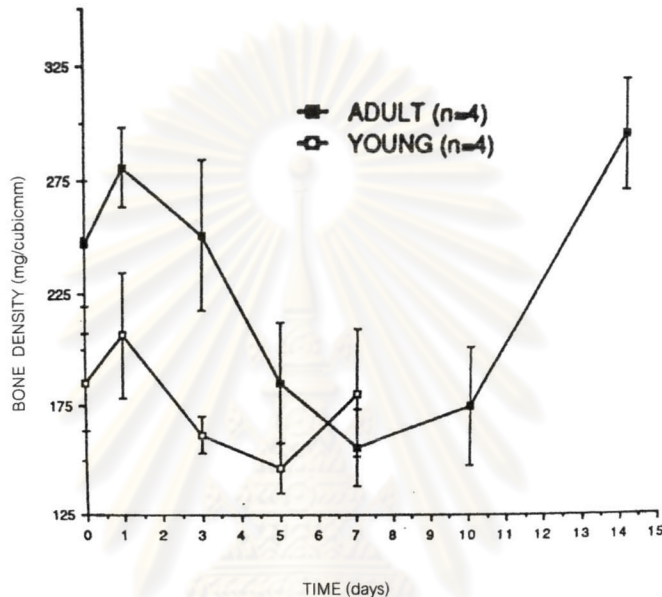
ผลของอายุต่อการเคลื่อนฟัน

อายุของฟันเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนฟัน โดย Bridges, King และ Mohammed, 1988 ได้ศึกษาถึงผลของอายุต่อการให้แรงเคลื่อนฟันและความหนาแน่นของแร่ธาตุในกระดูกง่าฟัน โดยศึกษาในหนูสปรากดอลลี 2 กลุ่ม กลุ่มแรกอายุ 21-28 วัน กลุ่มที่สองอายุ 3 เดือน ใช้แรงเคลื่อนฟัน 60 กรัม ซึ่งการศึกษาก่อนหน้านี้ (King and Fischlschweiger, 1982) บ่งชี้ว่า แรงขนาดนี้จะทำให้เกิดรูปแบบการเคลื่อนฟันทั้ง 3 ระยะ โดยใช้สปริงเกลียวปิด (เช่นเดียวกับการศึกษาของ Heller and Nanda, 1979) แล้วจึงวัดระยะการเคลื่อนฟันโดยวัดช่องห่างระหว่างฟันกรามซี่แรกและซี่ที่สอง และวัดความหนาแน่นของแร่ธาตุในกระดูกง่าฟันเป็นมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากเคลื่อนฟัน 1, 3, 5, 7, 10 และ 14 วัน ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบการเคลื่อนฟัน (tooth movement cycle) ในหนูทั้ง 2 กลุ่มให้ผลคล้ายกัน กล่าวคือการเคลื่อนฟันแบ่งเป็น 3 ระยะ ในระยะแรกเป็นการเคลื่อนฟันอย่างรวดเร็ว โดยคุณสมบัติความยืดหยุ่น (viscoelastic) ของเนื้อเยื่อ ซึ่งในระยะนี้หนูกลุ่มอายุน้อยเคลื่อนได้มากกว่าหนูกลุ่มสูงอายุ ส่วนในระยะที่สอง เป็นระยะที่มีการเคลื่อนฟันเล็กน้อย เพราะเกิดไฮยาลิไนเซชัน (hyalinization) และมีการละลายกระดูกจากด้านในของกระดูกง่าฟัน ในระยะนี้หนูกลุ่มอายุน้อยมีช่วงเวลาสั้นกว่ากลุ่มสูงอายุ และในระยะสุดท้าย เป็นช่วงที่มีการซ่อมสร้างกระดูกและมีการเคลื่อนฟัน ระยะนี้หนูกลุ่มอายุน้อยจะเคลื่อนฟันได้เร็วกว่าหนูกลุ่มสูงอายุ ดังนั้นในกลุ่มหนูอายุน้อยจึงมีปริมาณ และอัตราเร็วของการเคลื่อนฟันโดยรวมมากกว่าในหนูกลุ่มสูงอายุอย่างมีนัยสำคัญ รูปแบบการเคลื่อนฟันในหนูกลุ่มอายุน้อย เปรียบเทียบกับหนูกลุ่มสูงอายุ ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟแสดงการเคลื่อนฟันในหนูกลุ่มอายุน้อย เปรียบเทียบกับหนูกลุ่มสูงอายุ (ดัดแปลงจาก Bridges, T.; King, G.J.; Mohammed, A. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 93: p. 246, 1988)

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของแร่ธาตุในกระดูกเข้าฟัน ในหนูทั้ง 2 กลุ่ม มีรูปแบบคล้ายกัน แต่ในหนูกลุ่มอายุน้อยจะมีความหนาแน่นของแร่ธาตุน้อยกว่าที่ระยะเวลาเคลื่อนฟันเท่ากัน การลดลงของความหนาแน่นของแร่ธาตุของกระดูกเข้าฟันพบในช่วงระยะที่สองซึ่งมีทำลายกระดูก และการสร้างกระดูกใหม่ซึ่งมีแร่ธาตุน้อยและกลับเพิ่มสูงขึ้นในระยะการเคลื่อนฟันระยะที่สาม เพราะเริ่มมีการสร้างกระดูกเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 13 กราฟแสดงความหนาแน่นของกระดูกในหนูกลุ่มอายุน้อยเปรียบเทียบกับหนูกลุ่มสูงอายุ



ภาพที่ 13 กราฟแสดงความหนาแน่นของกระดูกในหนูกลุ่มอายุน้อย เปรียบเทียบกับหนูกลุ่มสูงอายุ (ดัดแปลงจาก Bridges, T.; King, G.J.; Mohammed, A. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 93: p. 246, 1988)

ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในหนูอายุน้อยมีความหนาแน่นของกระดูกน้อยกว่า จึงทำให้มีความยืดหยุ่นของกระดูกมากกว่า มีการซ่อมสร้างของกระดูกง่ายกว่า และช่วงที่สองของการเคลื่อนฟันสั้นกว่า เพราะมีการละลายกระดูกจากภายในกระดูกเข้าฟันเร็วกว่าในหนูกลุ่มสูงอายุ

จากการศึกษาของ Ren, 2003 ทำการเคลื่อนฟันกรามบนด้านหนึ่งของหนูด้วยเครื่องมือทางทันตกรรมจัดฟันด้วยแรง 10 cN. ส่วนอีกข้างหนึ่งเป็นด้านควบคุม เปรียบเทียบในหนูที่ยังไม่เจริญเต็มที่ (อายุ 6 สัปดาห์) และหนูที่โตเต็มวัยแล้ว (อายุ 9-12 เดือน) พบว่า ในหนูที่มีอายุน้อยกว่ามีการเคลื่อนได้เร็วกว่าในระยะแรกของการเคลื่อนฟัน แต่เมื่อเคลื่อนจนถึงระยะที่สอง (linear phase) ทั้ง 2 กลุ่มมีการเคลื่อนฟันในอัตราเดียวกัน ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า แม้ว่าในกลุ่ม

หนูที่มีการเจริญเต็มที่แล้วจะเริ่มเคลื่อนฟันช้ากว่า แต่เมื่อฟันเริ่มเคลื่อนแล้ว ก็มีประสิทธิภาพของการเคลื่อนฟันเช่นเดียวกับในกลุ่มที่มีอายุน้อยกว่า

นอกจากการศึกษาในสัตว์ทดลองแล้ว มีการศึกษาถึงผลของการจัดฟันต่อการละลายรากฟันในผู้ป่วย (Hendrix and Carels, 1994) ด้วยภาพรังสี ทำการศึกษาในผู้ป่วย 2 กลุ่ม เพื่อประเมินความเสี่ยงในเรื่องเพศ อายุผู้ป่วย ระยะการสร้างรากฟันเมื่อเริ่มรักษาทางทันตกรรมจัดฟัน และช่วงเวลาในการจัดฟันต่อการเกิดการละลายปลายรากคือ กลุ่ม A ได้แก่ผู้ป่วยที่รากฟันยังสร้างไม่สมบูรณ์ยกเว้นฟันกรามซี่แรก และกลุ่ม B ได้แก่ผู้ป่วยที่มีรากฟันสร้างสมบูรณ์แล้วยกเว้นฟันกรามซี่ที่สองและสาม จากผลการศึกษาพบว่า เพศ อายุผู้ป่วย และช่วงเวลาในการจัดฟันไม่มีความสัมพันธ์กับรากฟันที่สั้นลงเมื่อเปรียบเทียบภาพรังสีก่อนการรักษาและหลังการรักษาทั้ง 2 กลุ่ม แต่ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรากฟันสั้นภายหลังการรักษาทางทันตกรรมจัดฟัน คือ ระยะการสร้างรากฟันเมื่อเริ่มรักษาทางทันตกรรมจัดฟัน โดยฟันที่อยู่ในระยะการสร้างรากฟันเมื่อเริ่มจัดฟันจะมีการสร้างรากฟันต่อไป แต่จะมีความยาวที่สั้นกว่าความยาวปกติ (โดยเปรียบเทียบกลุ่ม A ภายหลังการรักษา และ กลุ่ม B ก่อนการรักษา) และฟันที่อยู่ในระยะที่การสร้างรากฟันสมบูรณ์แล้ว มีโอกาสเกิดการละลายรากฟันได้มากกว่ากลุ่มที่มีการสร้างรากฟันไม่สมบูรณ์อย่างมีนัยสำคัญ (โดยเปรียบเทียบกลุ่ม A ภายหลังการรักษา และ กลุ่ม B หลังการรักษา)

กลไกการปรับเปลี่ยนรูปร่างกระดูก (Bone remodeling)

Sandy, Farndale และ Meikle, 1993 กล่าวถึงกลไกในการปรับเปลี่ยนรูปร่างของกระดูกต่อการตอบสนองของฮอร์โมนและสิ่งกระตุ้นทางกล (mechanical stimuli) เซลล์สร้างกระดูก (osteoblast) เป็นเซลล์ที่มีบทบาทในการควบคุมการสร้างและการละลายกระดูกในกระบวนการปรับเปลี่ยนรูปร่างของกระดูก เนื่องจากมีรีเซปเตอร์ (receptor) ในการที่ไปกระตุ้นเซลล์สลายกระดูก (osteoclast) ให้ทำหน้าที่สลายหรือละลายกระดูก เปรียบเซลล์สร้างกระดูกเป็นจุดกลางหรือเป็นเซลล์ต้นกำเนิดของสิ่งอื่นๆ (providal cell) ซึ่งการตอบสนองของกระดูกนี้ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนรูปร่าง โดยแรงที่ให้ต่อฟันจะถ่ายทอดไปยังอวัยวะปริทันต์ที่อยู่โดยรอบ การปรับเปลี่ยนจะเกิดขึ้นได้ต้องมีสภาพของอวัยวะปริทันต์ที่ดีด้วย มีการศึกษาที่แสดงให้เห็นว่าเซลล์ของเอ็นยึดปริทันต์ด้านกุดมีการตายจาก apoptosis แล้วกระตุ้นให้มีเซลล์สลายกระดูกมาอยู่รวมกันบริเวณดังกล่าว (Hatai et al., 2001) และยังมีการศึกษาที่แสดงว่าเซลล์สลายกระดูกที่อยู่บริเวณเอ็นยึดปริทันต์ในขณะที่มีการให้แรงนั้น มาจากเซลล์ต้นกำเนิดของระบบหลอดเลือด (hemopoietic stem cell) แล้วถูกรวบรวมให้มาอยู่ในตำแหน่งด้านกุดของกระดูก (Tsay, 1999) ส่วนเซลล์สร้างกระดูกสามารถหลั่งสารอัลคาไลน์ ฟอสฟาเตส (alkaline phosphatase) สารคอลลาเจนชนิดที่ 1 (collagen type I) ออสติโอแคลซิน (osteocalcin) ออสติโอเนคติน

(osteonectin) ปัจจัยการเจริญเติบโต (growth hormone) ไซโตไคน์ (cytokines) คอลลาจีเนส (collagenase) และพลาสมิโนเจนแอคติเวเตอร์ (plasminogen activator) ซึ่งสารเหล่านี้มีผลต่อการทำงานของเซลล์สลายกระดูก นอกจากนี้เซลล์สร้างกระดูกยังสามารถสร้างตัวกันทางกายภาพ (physical barrier) มาควบคุมเซลล์สลายกระดูก โดยผิวกระดูกปกติถูกคลุมด้วยชั้นออสติออยด์ (osteoid) เป็นชั้นบางๆ เพื่อป้องกันการละลายผิวกระดูกจากเซลล์สลายกระดูกที่ไม่ได้ควบคุม

กลไกการปรับเปลี่ยนรูปร่างกระดูกเข้าฟันทั้งในยามปกติ และเมื่อได้รับแรงเคลื่อนฟัน (King et al., 1991) พบว่าในหนูที่ไม่ได้รับแรงเคลื่อนฟัน ฟันกรามจะเคลื่อนไปทางด้านไกลกลาง โดยการละลายด้านไกลกลางของกระดูกเข้าฟัน แต่ไม่มีความแตกต่างในการสร้างกระดูกระหว่างด้านใกล้กลางและด้านไกลกลาง ส่วนฟันที่อยู่ในด้านที่ได้รับแรงทางทันตกรรมจัดฟันมีความกว้างของเอ็นยึดปริทันต์มากในด้านใกล้กลางไปครึ่งหนึ่งของทางด้านบดเคี้ยว และมีการละลายในแนวตรง (linearly) ของปลายราก แสดงว่าฟันมีการเคลื่อนจากตำแหน่งเป็นอย่างมากในระยะแรก และเกิดที่บริเวณครึ่งหนึ่งของทางด้านบดเคี้ยวของรากฟัน (occlusal half of the root surface) และจากการประเมินปริมาณการสร้างกระดูกเกิดใหม่ในกระดูกเข้าฟันรอบๆ รากฟันที่ได้รับการเคลื่อนฟันในระยะแรกด้วย ลีด-โซเดียม อีดีทีเอ (lead-disodium EDTA) โดยใช้แรงเคลื่อนฟันกรามบนไปทางด้านใกล้กลางด้วยสปริงเกลียวปิดขนาดแรงต่างๆ กัน คือ 27, 60 และ 136 กรัม พบว่าไม่มีความแตกต่างในปริมาณกระดูกที่สร้างใหม่ของทั้ง 3 กลุ่ม จึงสรุปว่าขนาดของแรงเคลื่อนฟันที่ต่างกันไม่มีผลโดยตรงต่อการสร้างกระดูกใหม่ในด้านตั้งของผนังกระดูกเข้าฟัน (Ashizawa and Sahara, 1998)

นอกจากนี้มีการศึกษาถึงบริเวณที่มีการสร้างกระดูกชัดเจน ในระหว่างที่มีการเคลื่อนฟันด้วยเตตราไซคลิน (tetracycline vital bone marker) เปรียบเทียบในหนูที่มีอายุน้อย (13 สัปดาห์) และกลุ่มหนูที่สูงอายุ (60 สัปดาห์) พบว่าหนูในกลุ่มควบคุมมีการสร้างกระดูกชัดเจนที่บริเวณสันกระดูกเข้าฟัน (alveolar crest) บริเวณปลายรากฟัน (apical areas) และผนังกันกระดูกเข้าฟัน (inter-radicular septum) แสดงว่ามีการเจริญเติบโตของกระดูกเข้าฟันในแนวตั้ง (vertical alveolar bone growth) ส่วนหนูในกลุ่มทดลองมีการสร้างกระดูกชัดเจนบริเวณสันกระดูกเข้าฟัน และรักษาระดับความสูงของกระดูกเข้าฟันให้คงที่ แม้ในหนูที่สูงอายุ (Shimpo, Horiguchi and Nakamura, 2003)

การละลายและการซ่อมแซมรากฟันในระหว่างการเคลื่อนฟัน

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า การเคลื่อนฟันในทางทันตกรรมจัดฟันส่งเสริมต่อความเสี่ยงในการละลายที่ปลายรากฟัน และสูญเสียระดับความสูงของกระดูกเบ้าฟัน จากการศึกษาของ Harris and Baker, 1990 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความยาวรากฟันและการสูญเสียกระดูกเบ้าฟันในผู้ป่วยกลุ่มวัยรุ่น (อายุ 12 ปี) และวัยผู้ใหญ่ (อายุ 28 ปี) พบว่าในกลุ่มผู้ป่วยวัยผู้ใหญ่มีรากฟันสั้นกว่าและกระดูกเบ้าฟันลดลงมากกว่าในกลุ่มวัยรุ่น

ปัจจัยที่เป็นสาเหตุการเกิดการละลายรากฟันในระหว่างการรักษาทางทันตกรรมจัดฟันแบ่งเป็น 2 ประการ ได้แก่ ปัจจัยทางชีวภาพ เช่น ความเสี่ยงส่วนบุคคล (individual susceptible) พันธุกรรม (hereditary) ลักษณะโครงสร้างรูปร่าง (anatomic factor) และปัจจัยทางกายภาพ เช่น การให้แรงทางทันตกรรมจัดฟัน (orthodontic mechanotherapy) ประกอบด้วย ชนิดของเครื่องมือ ชนิดของแรงที่ใช้ ช่วงเวลาที่ให้แรง ระยะเวลาในการให้แรง ซึ่งมีรายงานการศึกษาทางคลินิกที่แสดงอุบัติการณ์ที่หลากหลาย การเฝ้าติดตามภาวะนี้จึงต้องมีการถ่ายภาพรังสีเป็นระยะๆ (Brezniak and Wasserstein, 1993)

จากการศึกษาลักษณะทางจุลกายวิภาคในระหว่างการเคลื่อนฟัน มักพบการละลายของรากฟันเสมอ (Rygh, Barber and Sims, 1981; Harry and Sims, 1982) โดยเกิดจากเซลล์ละลายเนื้อฟัน (odontoclast) ซึ่งมีรูปร่างคล้ายเซลล์สลายกระดูก (osteoclast) และรูปแบบการละลายรากฟันมีลักษณะเดียวกับการละลายกระดูก

จากการศึกษาของ Brudvik and Rygh, 1995 แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากระยะการละลายรากฟันเข้าสู่ระยะซ่อมสร้างเกิดขึ้นในขณะที่ให้แรงไม่มาก (light force) และมีความเกี่ยวข้องกับเซลล์ที่มีรูปร่างคล้ายไฟโบรบลาสต์ (fibroblast-like cells) ที่มาจากโดยรอบเข้าสู่บริเวณที่มีการละลายรากฟัน หลังจากให้แรง 10 วัน จะพบการสร้างเนื้อฟันขึ้นใหม่ที่บริเวณขอบ (periphery) ของแอ่งที่ถูกละลาย (resorption lacunae) ซึ่งเกิดโดยเซลล์ละลายเนื้อฟันในส่วนตรงกลาง ในขณะที่ขบวนการซ่อมแซมด้วยการสร้างเคลือบรากฟัน (cementogenesis) เคลือบรากฟันที่มีแร่ธาตุมาสะสมจะพบได้ผิวยางฟันที่ละลายใน 21 วัน หลังจากการสะสมเคลือบรากฟันใหม่ จึงเกิดโครงสร้างของเอ็นยึดปริทันต์ใหม่