บทที่ 2

เนื้อเรื่อง

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการประดิษฐ์ฟันปลอมเพื่อนำมายึดติดกับตัวรากเทียม สิ่งที่ต้องการอย่างยิ่งประการหนึ่งก็คือ ความแนบสนิทพอดีของโครงโลหะของฟันปลอม กับ ตัวรากเทียมหรือตัวหลัก เกี่ยวกับความแนบสนิทพอดีนี้ได้มีผู้ให้ข้อคิดเห็นแตกต่างกันหลายๆประการ Parel(1989)ได้ให้ความหมายของความแนบสนิทพอดีว่า เป็นความแนบสนิทกันของทุกๆส่วนของผิวสัมผัสที่เป็นโลหะของโครงโลหะกับผิวสัมผัสของตัวรากเทียมที่นำมายึดติดกัน ซึ่งความแนบสนิทพอดีนี้จะประกอบด้วย การสวมโครงโลหะบนตัวรากเทียมให้เข้าที่พร้อมๆกันโดยใช้แรงกดเพียงเบาๆเท่านั้น(Aparicio, 1994) และเมื่อทำการกดด้านใดด้านหนึ่งของโครงโลหะจะต้องไม่มีการกระดกของด้านตรงข้าม หรือเมื่อทำการทดสอบด้วยวิธี "one screw test" จะต้องไม่มีการยกตัวของโครงโลหะออกจากตัวรากเทียมตัวอื่นๆ(Tanและคณะ,1993) ส่วนKlinebergและMurray (1985)ได้ตั้งเกณฑ์การยอมรับความแนบสนิทพอดีโดยพิจารณาว่า ช่องว่างระหว่างโครงโลหะกับตัวรากเทียมจะต้องไม่เกิน 30ไมโครเมตร และเป็นบริเวณไม่น้อยกว่า 90% โดยรอบตัวรากเทียม ในขณะที่ Sorensenและคณะ(1992) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับความแนบสนิทของฟันปลอมกับตัวรากเทียมหรือกับตัวหลักในรากเทียมหลายๆระบบ ยอมรับความแนบสนิทพอดีในทางคลินิคว่าจะต้องมีช่องว่างระหว่างรอยต่อไม่เกิน 20-40ไมโครเมตร ส่วนMillingtonและLeung (1992)กล่าวว่า ถ้าช่องว่างระหว่างโครงโลหะกับตัวรากเทียมมีค่ามากกว่า 50ไมโครเมตรแล้วจะไม่สามารถดึงโครงโลหะให้เข้ามาแนบกับตัวรากเทียมโดยการใช้สกรูได้ ซึ่งIsaและHobkirk(1995)พบว่าถ้าช่องว่างระหว่างโครงโลหะกับตัวหลัก(transmucosal abutment)มีค่า 10ไมโครเมตรจึงจะสามารถดึงโครงโลหะให้เข้ามาแนบกับตัวหลักได้ โดยใช้แรงขันสกรู 10 นิวตัน/ซ.ม. แต่ทำให้แรงกดบนตัวหลักลดลงถึง 50% พร้อมกับทำให้โครงโลหะมีการเปลี่ยนรูปในลักษณะคล้ายอักษร "S" และเกิดแรงดึงเด้นบนตัวหลักได้

ในทางตรงกันข้าม Jemt(1996) และJemtและLie(1995)พบว่าช่องว่างระหว่างโครงโลหะกับตัวหลักที่มีขนาด 150ไมโครเมตรเป็นขนาดที่ยอมรับในทางคลินิค และสามารถใช้สกรูขันเพื่อดึงโครงโลหะให้เข้ามาแนบกับตัวหลักได้ ซึ่งสอดคล้องกับความคิดเห็นของYanase (1994) ส่วนRiedyและคณะ(1997)กล่าวว่า สายตาของมนุษย์ไม่สามารถที่จะตรวจสอบรอยต่อ

ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.05 ม.ม.ได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นช่องว่างของรอยต่อที่น้อยกว่า 0.025ม.ม.จึงเป็นขนาดที่ยอมรับได้ในทางคลินิค นอกจากนี้ยังได้มีผู้กล่าวถึงวิธีการตรวจสอบความแนบสนิทพอดีในทางคลินิค เช่น การใช้แสงสว่างและกล้องขยาย(Henry,1987) การใช้เครื่องมือปลายแหลม(explorer)และความรู้สึกเพื่อตรวจสอบรอยต่อ(Loos,1986) การใช้ fit checker (G-C Internat Scottsdale,AZ) (Goll ,1990) หรือตรวจสอบว่ามีฟองน้ำลายระหว่างรอยต่อของโครงโลหะกับตัวหลักหรือไม่ โดยการพยายามหมุนโครงโลหะบนตัวรากเทียม(Adellและคณะ, 1990) จะเห็นว่าความคิดเห็นเกี่ยวกับเกณฑ์การยอมรับความแนบสนิทพอดีของผู้ทดลองแต่ละท่านแตกต่างกันไป ซึ่งจนถึงปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ใดๆ ที่ยืนยันได้อย่างชัดเจนว่า ขนาดของช่องว่างระหว่างรอยต่อของโครงโลหะกับตัวรากเทียมหรือตัวหลักควรจะมีค่าเท่าใด จึงจะสามารถยอมรับได้ว่ามีความแนบสนิทพอดี(Jemtและคณะ,1996) อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากการใช้ขนาดของช่องว่างตรงบริเวณรอยต่อเป็นตัวบ่งบอกถึงความแนบสนิทพอดีแล้ว การที่ฟันปลอมและส่วนประกอบสามารถใช้งานได้อย่างยืนยาวโดยไม่เกิดความเสียหาย ในขณะเดียวกันก็สามารถรักษาการยึดติดของตัวรากเทียมกับกระดูกในลักษณะosseointegration เอาไว้ได้ ซึ่งมีความสำคัญและต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วย (Tanและคณะ, 1993)

แม้ว่าในทางอุดมคติโครงโลหะของฟันปลอมควรจะแนบสนิทพอดีกับตัวรากเทียมหรือตัวหลัก เพื่อทำให้เกิดการกระจายแรงที่เหมาะสมดังที่กล่าวมาแล้ว แต่ในทางปฏิบัติกลับพบว่าโครงโลหะของฟันปลอมที่ประดิษฐ์ขึ้นมักจะไม่แนบสนิทพอดีกับตัวรากเทียมหรือตัวหลัก ยิ่งจำนวนตัวรากเทียมที่ใช้มีมากเท่าใด หรือจำนวนส่วนประกอบที่นำมายึดติดกับตัวรากเทียมมีมากเท่าใด โอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนของความแนบสนิทก็มีมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งอาจมีค่าตั้งแต่ 20ไมโครเมตร(Tanและคณะ,1993;Klinebergและ Murrey,1985)ไปจนถึงหลายร้อยไมโครเมตร (Jemt,1996) และจากการทดลองของJemtและLie(1995) ที่ใช้เทคนิคโฟโตแกรมเมตตริก (photogrammetric technique) ตรวจความคลาดเคลื่อนของความแนบสนิทของโครงโลหะที่ได้จากการหล่อโลหะชิ้นเดียว(one-piece casting) เมื่อนำมายึดติดกับส่วนตัวรากเทียมและตัวหลักจำลองในแบบจำลองและกับตัวหลักในช่องปากพบว่า ความบิดเบี้ยวเฉลี่ย 3มิติ (mean 3 –D distortion)ของจุดกึ่งกลางของตัวหลักต่อยอดซึ่งติดกับโครงโลหะมีค่า 37ไมโครเมตรในแบบจำลองของขากรรไกรบน และ 75ไมโครเมตรในแบบจำลองของขากรรไกรล่าง ในขณะที่ทำการวัดในช่องปากพบความบิดเบี้ยวเฉลี่ย 3มิติของตำแหน่งเดียวกันนี้ มีค่า 90ไมโครเมตรในขากรรไกรบน และ 111 ไมโครเมตรในขากรรไกรล่างตามลำดับ ซึ่งค่าความบิดเบี้ยวที่ตรวจพบในช่องปากจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าต้องมีการคลาดเคลื่อนของการถ่ายทอดตำแหน่งตัวรากเทียมในช่องปากไปสู่ตำแหน่งตัวรากเทียมจำลองในแบบจำลอง หรือถ้า

หากการถ่ายทอดตำแหน่งถูกต้องแล้ว ก็แสดงว่าตำแหน่งของตัวหลักบนตัวรากเทียมจำลองในแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งตัวหลักนี้บนตัวรากเทียมในช่องปากไม่ได้อยู่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งมีสาเหตุมาจากความแนบสนิทที่ต่างกัน สอดคล้องกับผลการทดลอง Maและคณะ (1997)

อย่างไรก็ตามความแนบสนิทพอดีระหว่างโครงโลหะกับตัวหลักในแบบจำลอง จะเป็นเพียงตัวบ่งบอกถึงความเที่ยงตรงของขั้นตอนการประดิษฐ์โครงโลหะในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนที่วัดได้ในช่องปากจะเป็นตัวบ่งบอกว่ามีความผิดพลาดในขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งที่อาจเกิดขึ้นได้ในทางคลินิคหรือในห้องปฏิบัติการ และความคลาดเคลื่อนนี้จะสะสมต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ในขั้นตอนต่อๆไป ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้เริ่มตั้งแต่ ขั้นตอนการพิมพ์ปาก การสร้างแบบจำลอง การสร้างกระสวนขี้ผึ้งหรือกระสวนเรซิน(wax pattern or resin pattern) การทำเบ้า(investing) การสร้างแกนค้างรูเท(spruing) การหล่อโลหะ และการบัดกรีส่วนต่างๆ ของโครงโลหะให้ยึดเป็นชิ้นเดียวกัน(solder)(Riedyและคณะ,1997;Tanและคณะ,1993;Parel, 1989) ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นหาวิธีที่จะลดหรือกำจัดข้อผิดพลาดต่างๆในขั้นตอนเหล่านี้ เพื่อทำให้เกิดความแนบสนิทพอดีระหว่างโครงโลหะกับตัวหลักให้มากที่สุด

จากการที่วิธีการพิมพ์ปากเพื่อบันทึกตำแหน่งตัวรากเทียมนั้นแตกต่างจากการพิมพ์ปากเพื่อประดิษฐ์ฟันปลอมแบบติดแน่นทั่วๆไป ดังนั้นวิธีการพิมพ์ปากเพื่อบันทึกตำแหน่งตัวรากเทียมแบบใดที่สามารถถ่ายทอดตำแหน่งตัวรากเทียมในช่องปากมาสู่แบบจำลองได้ดีที่สุดแล้วจะเป็นวิธีการที่ทำให้เกิดความแนบสนิทได้ดีที่สุด จึงได้มีการปรับปรุงวิธีการพิมพ์รากเทียมที่นอกเหนือไปจากวิธีการพิมพ์โดยตรงและโดยอ้อม เช่น การใช้อะคริลิคเรซินชนิดบ่มด้วยตัวเอง(self cured acrylic resin) ยึดตัวต่อยอดถ่ายทอดให้ติดกับถาดพิมพ์ปากเฉพาะบุคคล(individual tray) ในขณะที่ทำการพิมพ์รากเทียม(Assifและคณะ, 1996) หรือ การใช้อะคริลิคเรซินสำหรับสร้างแบบชนิดบ่มด้วยตัวเอง(self cured inlay pattern resin)จำนวนน้อยๆ ยึดอะคริลิคเรซินที่ติดกับตัวต่อยอดถ่ายทอดแต่ละตัวในช่องปากเข้าด้วยกันเพื่อทำเป็นอุปกรณ์นำแนวเรซิน(reisn Jig) แล้วจึงพิมพ์ทับด้วยวัสดุพิมพ์ปากอีกที(Lechner,Duckmantonและ Klineberg,1992) ซึ่งเชื่อว่าการใช้อะคริลิคเรซินจำนวนน้อยๆจะทำให้การบิดเบี้ยวภายหลังปฏิกริยาโพลีเมอไรเซชั่น (polymerization)ลดลง และอุปกรณ์นำแนวเรซินนี้ยังสามารถนำกลับมาทดสอบความแนบสนิทในช่องปากภายหลังจากเทแบบจำลองได้ ถึงแม้ว่าจะมีการใช้เทคนิคพิเศษในการพิมพ์ปากเพื่อบันทึกตำแหน่งตัวรากเทียมหลายๆแบบก็ตาม แต่ยังคงพบเสมอว่าโครงโลหะที่ประดิษฐ์ขึ้นมานั้นไม่แนบกับสนิทพอดีกับตัวหลักทั้งในแบบจำลองและในช่องปาก ในประเด็นนี้ Assif

และคณะ(1996)ได้ให้ข้อคิดเห็นว่า ความคลาดเคลื่อนของความแนบสนิทนี้มิได้เกิดจากวิธีการพิมพ์ปากเพื่อบันทึกตำแหน่งตัวรากเทียมแต่เพียงอย่างเดียว แต่อาจเกิดจากการใช้ปริมาณแรงที่ยึดส่วนประกอบต่างๆของรากเทียมให้ติดกับตัวรากเทียมและตัวรากเทียมจำลองไม่เท่ากันตลอดขั้นตอนการประดิษฐ์ฟันปลอม ทั้งในคลินิคและในห้องปฏิบัติการซึ่งได้แก่ ปริมาณแรงที่ใช้ยึดตัวต่อยอดถ่ายทอดกับตัวรากเทียม ไม่เท่ากับ ที่ใช้ยึดตัวต่อยอดถ่ายทอดกับตัวรากเทียมจำลองในขั้นตอนการพิมพ์ปากและการสร้างแบบจำลอง ร่วมกับความแข็งผิวของตัวรากเทียมจำลองอาจจะไม่มากพอที่จะทนทานต่อการขันสกรูด้วยปริมาณแรงที่เท่ากัน จึงทำให้ขาดความแม่นยำในการยึดตัวต่อยอดถ่ายทอดกับตัวรากเทียมและตัวรากเทียมจำลอง ส่วนในขั้นตอนการประดิษฐ์โครงโลหะนั้น ปริมาณแรงที่ใช้ยึดตัวหลักกับตัวรากเทียมจำลองในแบบจำลองไม่เท่ากับที่ใช้ยึดตัวหลักกับตัวรากเทียมในช่องปาก จึงทำให้ความแนบสนิทของตัวหลักกับตัวรากเทียมและตัวรากเทียมจำลองไม่เท่ากัน เมื่อรวมความผิดพลาดทั้ง 4ขั้นตอนที่กล่าวมา ก็เพียงพอที่จะทำให้โครงโลหะไม่แนบสนิทกับตัวหลักได้ จะเห็นได้ว่านอกเหนือจากความไม่เที่ยงตรงและความไม่คงที่ในการผลิตส่วนประกอบต่างๆของรากเทียมทำให้เกิดความไม่แนบสนิทพอดีแล้ว(Binon,1992) ปริมาณแรงขันสกรูในขั้นตอนต่างๆก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความไม่แนบสนิทด้วยเช่นกัน ซึ่งผู้ทำการทดลองเกี่ยวกับความเที่ยงตรงของวิธีการพิมพ์ปากเพื่อบันทึกตำแหน่งตัวรากเทียมในหลายๆการทดลองไม่ได้กล่าวถึงปัจจัยนี้เลย

ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง ก็มีโอกาสก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งตัวรากเทียมจำลองได้ เนื่องจากปลาสเตอร์หินชนิดที่III ที่ใช้เทแบบจำลองมีการขยายตัวเชิงเส้นขณะแข็งตัว(setting expansion) ถึง 0.3% (Phillip,1991) และ ถ้าร่วมกับความไม่แนบสนิทของตัวต่อยอดถ่ายทอดกับตัวรากเทียมจำลองแล้ว การขยายตัวของปลาสเตอร์หินก็มีโอกาสทำให้ตัวรากเทียมจำลองขยับไปจากตำแหน่งที่ควรจะเป็น ยิ่งตัวรากเทียมที่ใช้มีจำนวนมากเท่าใดความคลาดเคลื่อนรวมที่เกิดขึ้นก็มีมากเท่านั้น ดังนั้น HussainiและWong(1997)จึงปรับปรุงวิธีเทแบบจำลองโดยทำการยึดตัวรากเทียมจำลองแต่ละตัวเข้าด้วยกันด้วยปลาสเตอร์พิมพ์(impression plaster)ซึ่งมีการขยายตัวเชิงเส้นขณะแข็งตัวเพียง 0.06%เท่านั้น(Craig,1993) จากนั้นจึงตัดปลาสเตอร์พิมพ์เหล่านี้แยกจากกันเป็นส่วนๆแล้วทำการยึดแต่ละส่วนใหม่ ด้วยปลาสเตอร์พิมพ์ปริมาณน้อยๆเพื่อลดการขยายตัวขณะแข็งตัว ดังนั้นปลาสเตอร์พิมพ์จึงเสมือนเป็นเฝือก(splint)ยึดตัวรากเทียมจำลองแต่ละตัวไม่ให้ขยับขณะเทแบบจำลอง และป้องกันการขยับตัวของตัวรากเทียมจำลองขณะที่ปลาสเตอร์หินแข็งตัว ด้วยวิธีการนี้เมื่อทำการวัดช่องว่างระหว่างโครงโลหะกับตัวหลักมีค่า 20-36ไมโครเมตร ในขณะที่ใช้วิธีเทแบบจำลองทั่วๆไปพบว่าช่องว่างที่วัดได้มีค่า 82-139ไมโครเมตร จะเห็นได้ว่าทั้งขั้นตอนการพิมพ์รากเทียมและการสร้างแบบจำลอง

สามารถก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการถ่ายทอดตำแหน่งตัวรากเทียมได้ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงพบเสมอว่าโครงโลหะที่ประดิษฐ์ให้แนบกับตัวรากเทียมจำลองในห้องปฏิบัติการกลับไม่แนบสนิทกับตัวรากเทียมในช่องปากได้ อันเนื่องมาจากการที่ทันตแพทย์และช่างทันตกรรมขาดความระมัดระวังและละเลยสิ่งเล็กๆน้อยๆเหล่านี้

ถึงแม้ว่าจะได้แบบจำลองที่มีความเที่ยงตรงสูงก็ตาม แต่พบว่ายังมีขั้นตอนอื่นที่อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของความแนบสนิทได้ ซึ่งได้แก่ ขั้นตอนการประดิษฐ์กระสวนขี้ผึ้ง หรือกระสวนเรซิน เนื่องจากทั้งขี้ผึ้งและอะคริลิคเรซินมีการเปลี่ยนรูปภายหลังการแข็งตัว โดยขี้ผึ้งที่ใช้สร้างแบบ(inlay casting wax)มีการขยายตัวเชิงเส้นถึง 0.7% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 20องศาเซลเซียส หรือมีการหดตัว 0.35%เมื่อเย็นตัวจากอุณหภูมิ 37องศาไปสู่ 25องศาเซลเซียส ส่วนอะคริลิคเรซินมีการหดตัวเชิงเส้นภายหลังการบ่มตัว 0.6%(Phllip,1991) และด้วยเหตุผลที่ว่าที่กระสวนเรซินมีความแข็งแรงและสามารถนำไปทดสอบความแนบสนิทกับตัวรากเทียมในช่องปากได้(Rasmussen,1997;Henry,1987)จึงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม อย่างไรก็ตามกระสวนเรซินที่ประดิษฐ์ขึ้นจะต้องมีความหนาเพียงพอที่จะไม่เกิดการบิดงอในขณะทดสอบความแนบสนิทในช่องปาก รวมทั้งการบ่มเรซินควรทำในหม้ออัดความดันและทิ้งช่วงเวลาในการเกิดปฏิกริยาโพลีเมอร์ไรเซชั่นอย่างสมบูรณ์อย่างน้อย 12ช.ม. ก่อนจะนำไปทดสอบในช่องปาก(Goll,1991) Nessและคณะ(1992)ได้ทดสอบเกี่ยวกับการบิดเบี้ยวของอะคริลิคเรซินที่ใช้ประดิษฐ์กระสวนเรซิน3ชนิด ซึ่งได้แก่ Relate acrylic resin(Parkell,Farmingdale ,NY) GC pattern resin(GC Int Corp,Scottsdale,Ariz.) และDuraley, Lotite242(Lottite Corp, Cleveland,Ohio.) พบว่าอะคริลิคเรซินทั้ง 3ตัวมีการบิดเบี้ยวต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และไม่มีอะคริลิคเรซินตัวใดเลยที่มีความเที่ยงตรงในการรักษาตำแหน่งตัวหลักต่อยอดได้อย่างสมบูรณ์โดยไม่เกิดการบิดเบี้ยว ยิ่งกระสวนเรซินมีขนาดใหญ่เท่าใด แรงเค้นสะสมที่ตกค้างในตัวเรซินก็จะมีมากตามเท่านั้น เมื่อนำกระสวนเรซินออกจากแบบจำลอง จะเกิดการบิดเบี้ยวเนื่องจากการปลดปล่อยแรงเค้นสะสมออกมา ถ้าร่วมกับตัวหลักต่อยอดไม่แนบสนิทพอดีกับตัวหลักจำลองในแบบจำลอง ก็จะเกิดการขยับของตัวหลักต่อยอดในขณะที่อะคริลิคเรซินเกิดการหดตัวซึ่งการบิดเบี้ยวเกิดได้ทั้ง 3มิติ โดยที่การบิดเบี้ยวในแนวระนาบมีค่าถึง 37ไมโครเมตร ในขณะที่การบิดตัวของส่วนท้ายกระสวนเรซินอาจมีค่า 9.6ไมโครเมตร ดังนั้นจึงควรพิสูจน์ความเที่ยงตรงของกระสวนเรซินโดยนำไปทดสอบความแนบสนิทกับตัวหลักในช่องปากอีกครั้ง ถ้าพบว่าเกิดความไม่แนบสนิทสามารถแก้ไขได้ 3วิธี(Goll,1991)ดังต่อไปนี้

1.ทำการพิมพ์ปากเพื่อบันทึกตำแหน่งตัวรากเทียมใหม่

2.ทำการตัดกระสวนเรซินบริเวณรอยต่อระหว่างตัวหลักต่อยอดที่ไม่แนบสนิทออกเป็นส่วนๆแล้วยึดแต่ละส่วนใหม่ด้วยอะคริลิคเรซินปริมาณน้อยๆ จากนั้นเทแบบจำลองใหม่เฉพาะตำแหน่งที่ตัวรากเทียมจำลองมีคลาดเคลื่อน

3.ทำเช่นเดียวกับข้อ 2 แต่จะยึดตัวหลักต่อยอดด้วยตัวหลักจำลองใหม่ทั้งหมด แล้วเทแบบจำลองทั้งชิ้นใหม่

จะเห็นได้ว่าแทบทุกขั้นตอนที่กล่าวมา การขาดความแม่นยำหรือความแนบสนิทพอดีของส่วนประกอบต่างๆของรากเทียม กับ ตัวรากเทียมและตัวรากเทียมจำลอง ซึ่งได้แก่ ตัวต่อยอดถ่ายทอดกับตัวรากเทียม ตัวต่อยอดถ่ายทอดกับตัวรากเทียมจำลอง ตัวหลักกับตัวรากเทียมจำลอง ตัวหลักกับตัวรากเทียม จะเป็นตัวเสริมให้ความผิดพลาดในขั้นตอนต่างๆเหล่านั้นเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามยังมีอีกขั้นตอนหนึ่งที่มีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อการบิดเบี้ยวของโครงโลหะคือขั้นตอนการการหล่อโลหะ ซึ่งTanและคณะ(1993)ได้กล่าวถึงปัจจัยที่มีผลต่อการบิดเบี้ยวของโครงโลหะในขั้นตอนนี้คือ

1.กระบวนการทำเบ้า(investing procedure)ซึ่งประกอบด้วย การขยายตัวขณะแข็งตัว การขยายตัวเหตุความร้อน(thermal expansion)ของวัสดุทำเบ้า และข้อจำกัดของตัวแหวนเพื่อหล่อ(casting ring)

2.การหดตัวของโลหะหล่อ(casting shrinkage)

3.การบิดงอของโครงโลหะเนื่องจากการปลดปล่อยความเค้นในขณะที่ทำการตัดแกนค้างรูเท และการขัดเรียบโครงโลหะ

ซึ่งการหดตัวเชิงเส้น(linear shrinkage)ของโลหะทองผสมมีค่า 1.25-1.7% ในขณะที่โลหะผสม(base metal)มีค่า 2.5%(Craig,1989) ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุทำเบ้าที่เหมาะสมกับชนิดของโลหะ(Hobo,1990) การเลือกตำแหน่งการติดตั้งแกนค้างรูเทที่เหมาะสม(Taylorและ Bergman,1990) และการออกแบบแกนค้างรูเทที่ถูกต้อง(Binon,1994) จะมีผลอย่างมากต่อความเที่ยงตรงของโครงโลหะที่หล่อได้

Bruce(1964)Fusayamaและคณะ(1994)เชื่อว่าการหล่อโลหะของสะพานฟันชิ้นเดียว จะทำให้เกิดความแนบสนิทกับฟันหลักมากกว่าการบัดกรีแต่ละส่วนของสะพานฟันเข้าด้วยกัน แต่ Ziebertและคณะ(1986)ได้ประเมินโครงโลหะของสะพานฟันที่มีซี่ฟันปลอมจำนวน 2ซี่ และมีส่วนยึด(retainer) 3ซี่ ซึ่งได้จากการหล่อโลหะชิ้นเดียว พบว่าขอบของครอบฟันไม่แนบสนิทกับฟันหลักมีค่าเฉลี่ยถึง 105ไมโครเมตร ในขณะที่โครงโลหะที่ได้จากการหล่อโลหะเป็นส่วนๆ

แล้วนำมาบัดกรีกันภายหลังจะมีช่องว่างบริเวณขอบเพียง 68ไมโครเมตร ส่วนSchiffliegerและคณะ(1995)พบว่าการใส่สะพานฟันชนิดเดียวกับที่ใช้ในการทดลองของ Zieberและคณะ(1986) ให้เข้าที่นั้น ถ้าหากตัดโครงโลหะที่หล่อชิ้นเดียวออกเป็นส่วนๆแล้วนำไปสวมกับฟันหลัก จะสามารถลดความคลาดเคลื่อนได้ 129ไมโครเมตร

ในการประดิษฐ์โครงโลหะของฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียมหลายๆตัว ก็มีพื้นฐานมาจากการหล่อโครงโลหะของสะพานฟัน โดยที่โครงโลหะนี้จะถูกหล่อออกมาเป็นส่วนๆด้วยโลหะทองผสมชนิดที่IIIแล้วนำมาบัดกรีกันภายหลัง(LanquistและCarlsson,1983;Adellและคณะ,1981) ต่อมา Leungและคณะ(1982)ได้ปรับปรุงวิธีการนี้โดยใช้โลหะผสมเงิน-พาลาเดี่ยม (silver-palladium alloy)แทนโลหะทองผสมและหล่อโครงโลหะชิ้นเดียวพบว่า ช่องว่างระหว่างโครงโลหะกับตัวหลักมีเพียง 30ไมโครเมตร ซึ่งWhite(1991)กล่าวถึงการหล่อโครงโลหะชิ้นเดียวแบบShiffieldสามารถทำให้เกิดความแนบสนิทกับตัวหลักโดยไม่ต้องหล่อโครงโลหะเป็นส่วนๆแล้วนำมาบัดกรีกันภายหลัง และยังมีข้อดีกว่าในแง่ที่สามารถคงคุณสมบัติความแข็งแรงของโลหะ(work hardening properties)เอาไว้ได้ รวมทั้งใช้เวลาในห้องปฏิบัติการน้อยกว่า ในขณะที่โครงโลหะที่ได้จากการบัดกรีชิ้นส่วน 2-3ชิ้นเข้าด้วยกันจะมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัตินี้และไม่สามารถทำการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อน(heat treatment)ได้ นอกจากนี้โครงโลหะอาจมีโอกาสเกิดการเปลี่ยนรูป ถ้าชิ้นส่วนของโครงโลหะที่นำมาบัดกรีมีขนาดใหญ่เกินกว่าวัสดุทำเบ้าจะสามารถต้านทานการหดตัวของโลหะในขณะที่เย็นตัวได้ ในทางตรงข้าม KlinebergและMurray(1985)กลับมีความคิดเห็นว่า การหล่อโครงโลหะชิ้นเดียวซึ่งมีขนาดใหญ่จะมีโอกาสเกิดการบิดเบี้ยวของโครงโลหะได้สูงกว่า จึงได้แนะนำให้หล่อโครงโลหะเป็นส่วนๆแล้วนำมาเชื่อมกันภายหลังโดยใช้ดรรชนีภายในช่องปาก(intraoral index)เป็นตัวช่วย ซึ่ง Tanและคณะ(1993)ก็พบเช่นเดียวกันว่าโครงโลหะลักษณะ ราว(bar)ที่ได้จากการหล่อโลหะชิ้นเดียวไม่มีความแนบสนิทพอดีกับตัวหลักทั้งหมด เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธี"one screw test" โครงโลหะด้านตรงข้ามกับบริเวณที่กดจะมีการยกตัวจากตัวหลัก 8.26ไมโครเมตร และการออกแบบภาคตัดโครงโลหะที่ต่างกันคือ ออกแบบรูปทรงคล้ายอักษร "L" เปรียบเทียบกับแบบอักษร "U" มิได้ช่วยให้ความแนบสนิทของโครงโลหะ ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่วน Jemt และ Linden (1992)พบว่าโครงโลหะที่ได้จากการกลึงโลหะไททาเนี่ยมเป็นส่วนๆแล้วนำมาหลอมเชื่อมด้วยการใช้เลเซอร์(machined and leser-welded titanium framework)จะมีความแนบสนิทกับตัวหลักมากกว่าโครงโลหะที่ได้จากการหล่อโลหะชิ้นเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการทดลองของJemt (1995)และRiedyและคณะ(1997)ก็ให้ผลคล้ายคลึงกัน และช่องว่างระหว่างตัวหลักกับโครง

โลหะที่ได้จากวิธีการนี้มีค่าน้อยกว่า 25ไมโครเมตร(Riedyและคณะ, 1997) ดังนั้นจึงพอจะสรุปแนวทางการประดิษฐ์โครงโลหะของฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียมเป็นข้อๆดังนี้

1.หล่อโครงโลหะเป็นชิ้นเดียว(Alberktssonและคณะ,1986;Henry,1997;Loos,1986)

2.หล่อโครงโลหะเป็นส่วนๆแล้วนำมาบัคกรี หรือหลอมเชื่อมกัน(Klinebergและ Murray, 1985;Lundquistและ Carlsson,1983)

3.หล่อโครงโลหะเป็นชิ้นเดียว แต่ถ้าโครงโลหะไม่แนบสนิทกับตัวหลักจึงทำการตัดแล้วนำมาบัคกรีใหม่(Branemarkและคณะ,1985;Loos,1986;Worthington,Bolender และTaylor,1987)

นอกจากนี้ยังมีวิธีการที่แตกต่างออกไป เช่นทำการยึดตัวหลักต่อยอดกับโครงโลหะในช่องปากด้วยเรซิน(Parel,1989;McCartney,1991) หรือด้วยซีเมนต์(Seller,1989) หรือด้วยการบัคกรี(McCartneyและDoud,1993) หรือด้วยวิธีซิลิโคตเตอร์(silicoater)(Aparicio,1994) หรือใช้ระบบpreci-disc(Uludamaและ Leung,1996) โดยวิธีการเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะชดเชยการบิดเบี้ยวของโครงโลหะ และทำให้โครงโลหะแนบกับตัวหลักมากที่สุด ซึ่งจนถึงขณะนี้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าวิธีการใดดีที่สุด

จะเห็นได้ว่าแทบทุกขั้นตอนของการประดิษฐ์ฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียมทั้งในคลินิกและห้องปฏิบัติการ มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนของความแนบสนิทของฟันปลอมได้ ถึงแม้ว่าได้มีการค้นคว้าหาวิธีการต่างๆดังที่กล่าวมาเพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อน แต่วิธีการเหล่านี้ดูเหมือนเป็นการแก้ไขที่ปลายเหตุ เพราะว่าตราบใดก็ตามที่ยังไม่สามารถทำให้ความแนบสนิทของตัวหลักกับตัวรากเทียมในช่องปากเท่ากับที่ตัวหลักแนบสนิทกับตัวรากเทียมจำลองในแบบจำลองก่อนการประดิษฐ์โครงโลหะแล้ว ก็จะไม่สามารถทำให้โครงโลหะเกิดความแนบสนิทในช่องปากได้ ดังนั้นจึงควรที่จะมีความรู้เกี่ยวกับ การยึดติดระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมด้วยสกรู และปัจจัยที่มีผลต่อความแนบสนิทและความเสถียรระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมที่ใช้การยึดติดแบบสลักเกลียว รวมทั้งกลไกการกระจายแรงในฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียม เพื่อทำให้สามารถทราบสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของความแนบสนิท และทำการการแก้ไขให้ได้มากที่สุดดังจะได้อธิบายต่อไป

กลไกการยึดติดระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมด้วยสกรู

สกรู หรือ หมุดเกลียว และ สลักเกลียว(bolt)มักจะถูกใช้เป็นตัวยึดประเภทกึ่งถาวรเพื่อยึดชิ้นส่วนต่างๆให้ติดกัน โดยที่สกรูหมายถึง เหล็กรูปทรงกระบอกที่ปลายข้างหนึ่งมีหัวเป็นรูปต่างๆส่วนอีกปลายหนึ่งเป็นเกลียว ใช้สำหรับยึดชิ้นส่วนให้ติดกันโดยไม่ต้องใช้แป้นเกลียว(nut) ในขณะที่สลักเกลียวหมายถึง เหล็กรูปทรงกระบอกที่ปลายหนึ่งมีหัวเป็นรูปต่างๆ อีกปลายหนึ่งเป็นเกลียวใช้สอดผ่านตลอดรูกลวงของชิ้นส่วนที่ต้องการจะยึดให้ติดกัน โดยมีแป้นเกลียวขันเข้าทางปลายที่เป็นเกลียว(กิติ อินทรานนท์,2539) และเมื่อนำมาใช้ในทางทันตกรรมรากเทียมแล้ว สกรูของตัวหลักจะใช้ยึดฟันปลอม หรือ ตัวหลักให้ติดกับตัวรากเทียม(Carr, Brunskiและ Hurley,1996) ด้วยวิธีการนี้ สกรูจึงทำหน้าที่เสมือนเป็นส่วนหนึ่งของระบบ ซึ่งมักเรียกการยึดติดแบบนี้ว่า การยึดติดแบบสลักเกลียว(bolt joint) โดยที่สกรูของตัวหลักจะผ่านรูเรียบตรงกลางตัวหลักเพื่อให้เกลียวที่อยู่ปลายสกรูขันเข้ากับเกลียวด้านในของตัวรากเทียม และส่วนหัวของสกรูกดตัวหลักให้แนบกับตัวรากเทียม เป็นการทำหน้าที่ยึดตัวหลักให้ติดกับตัวรากเทียมซึ่งการยึดติดแบบนี้มีข้อดีกว่าการยึดติดแบบถาวรคือ สามารถที่จะคลายสกรูออกเพื่อประเมินสภาพของฟันปลอม ตัวหลัก ตัวรากเทียม เพื่อการบำรุงรักษา การเปลี่ยนชิ้นส่วน และการซ่อมแซม(Binon,1994)

ในช่วงแรกๆของการขันสกรูเพื่อยึดตัวหลักเข้ากับตัวรากเทียม จะไม่เกิดความต้านทานจนกว่า ด้านใต้ของหัวสกรู(screw face) ตัวหลัก และตัวรากเทียมมาสัมผัสกัน เมื่อถึงจุดนี้การขันสกรูเพิ่มจะทำให้สกรูยืดตัวออก ก่อให้เกิดการดึง(tension)ในตัวสกรูหรือเรียกว่า ภาระกระทำก่อน(preload)ซึ่งจะเกิดตั้งแต่ส่วนหัวของสกรูไปจนถึงเกลียวของสกรู(Jorneus,Jemt,และ Carlson,1992) และจากคุณสมบัติการคืนตัวเนื่องจากความยืดหยุ่นของตัวสกรู(elastic recovery) ทำให้ส่วนต่างๆของตัวหลักกดดันกับตัวรากเทียม(Sakaguchiและ Borgersen,1995) ก่อให้เกิดแรงเสียดทานระหว่าง เกลียวของสกรู กับเกลียวด้านในของตัวรากเทียม ผิวด้านใต้หัวสกรูกับตัวหลัก และผิวด้านล่างของตัวหลักกับส่วนบนของตัวรากเทียม (Burguette และคณะ,1994; Dixon และคณะ,1995) ทำให้เกิดความเสถียรของการยึดติด ยิ่งภาระกระทำก่อนมากเท่าใดความแนบสนิทระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมก็มีมากเท่านั้น เป็นการเพิ่มอายุความล้า(fatique life)ของสกรู(Burgueteและคณะ,1994)และป้องกันการหลวมของสกรูได้ อย่างไรก็ตามถ้าแรงทั้งหมดที่กระทำต่อสกรูซึ่งได้แก่ ภาระกระทำก่อน และแรงจากภายนอก(เช่น แรงบดเคี้ยว) มีค่ามากกว่าจุดคราก(yield point)ของสกรูแล้ว ความทนทานต่อความล้า(fatique performance) ของสกรูจะลดลงอย่างรวดเร็ว การยึดติดจะขาดความเสถียรและสกรูจะหลวมในที่สุด ซึ่ง

สอดคล้องกับความสัมพันธ์ของภาระกระทำก่อน กับ อายุความล้าของสกรูในทางทันตกรรม รากเทียมที่อธิบายโดย Pattersonและ John(1992) ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจการยึดติดของตัวหลักกับตัวรากเทียมได้ดียิ่งขึ้น จึงจะอธิบายการวิเคราะห์แรงเมื่อทำการขันสกรูเข้ากับแป้นเกลียว เป็น2 ขั้นตอนดังนี้

1.การวิเคราะห์แรงขณะที่เกลียวของสกรูหมุนเข้ากับแป้นเกลียว

2.การวิเคราะห์แรงขณะเกิดภาวะการยึดแบบสลักเกลียว

ก่อนอื่นจะขออธิบายความหมายของคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับสกรู คือ

- พิตช์(pitch)เป็นระยะห่างระหว่างเกลียวที่อยู่ติดกัน ซึ่งวัดตามแนวแกนสกรู
- เส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่(the major diameter,d)เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ที่สุดของเกลียว
- เส้นผ่าศูนย์กลางเล็ก(the minor diameter,d_r or d_i)เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กที่สุดของเกลียว
- เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย(the mean diameter,d_m)เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางที่เฉลี่ยระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ที่สุดกับเล็กที่สุดของเกลียว
- ลีด(lead,l)เป็นระยะที่แป้นเกลียวเคลื่อนที่ขนานกับแนวแกนสกรู เมื่อแป้นเกลียวเคลื่อนที่ 1รอบ ลีดจะมีค่าเท่ากับพิตช์

1.การวิเคราะห์แรงขณะที่เกลียวของสกรูหมุนเข้ากับเกลียวของแป้นเกลียว

Creamer(1976)ได้อธิบายว่า ขณะที่เกลียวของสกรูหมุนเข้ากับเกลียวของแป้นเกลียว ถ้ามีภาระงาน(load)มากระทำตรงจุดกึ่งกลางของเกลียวใดเกลียวหนึ่ง และต้องการยกภาระงานนี้ขึ้นโดยการหมุนเกลียว 1รอบ สามารถวิเคราะห์แรงของสกรูได้โดยการยึดเกลียวที่เคลื่อนที่ 1รอบนี้ให้อยู่ในระนาบเดียว ซึ่งจะได้ลักษณะระนาบเอียง ดังรูปที่ 3 โดยที่ความสูงของระนาบเอียงเทียบเท่ากับลีด ส่วนชันของระนาบเอียงเทียบเท่ากับเส้นเกลียว และฐานของระนาบเอียงเทียบเท่ากับเส้นรอบวงเฉลี่ยของเกลียว(คำนวณจากเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย)

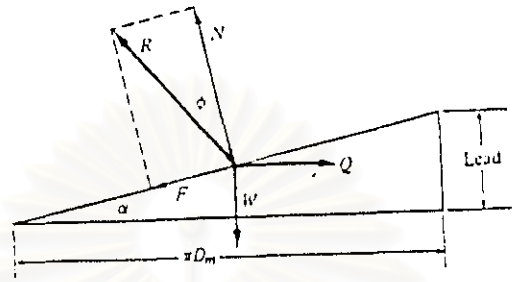
การที่จะสามารถยกภาระงานขึ้นได้ จะต้องเอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างเกลียวของสกรูกับเกลียวของแป้นเกลียว ดังนั้นแรงที่ต้องให้กับสกรูจะต้องมากกว่าแรงบิดเสียดทาน (resistance torque,T_r)ของเกลียวสกรูซึ่งมีค่าดังนี้

$$T_r = \frac{WD_m(\tan\alpha+f)}{2(1+f\tan\alpha)}$$ สมการที่ 1(Creamer,1976)

ห้องสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ ค่าf = tanϕ =F/N ,tan α = lead/πD_m

และ W= ผลรวมของแรงทั้งหมดในแนวดิ่ง =R sin(α+ϕ)



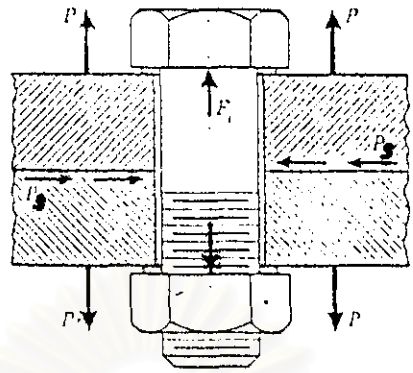
รูปที่ 3 แสดงการวิเคราะห์แรงของสกรู(เมื่อยกภาระงานขึ้น)

ที่มา: Creamer,R.H.Machin design. 2nd ed. (Massachusetts: Adderson-Wesley publishing company,1976) ,p.278.

เมื่อพิจารณาสมการ1 จะเห็นได้ว่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างเกลียวของสกรูกับแป้นเกลียว ซึ่งขึ้นกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของโลหะที่ทำสกรูและแป้นเกลียว ลักษณะทางเรขาคณิตของเกลียวเช่น เส้นผ่าศูนย์กลางของสกรู มุมลีดของเกลียว มีผลอย่างมากต่อปริมาณของแรงที่ต้องให้แก่สกรูเพื่อเอาชนะแรงบิดเสียดทานของเกลียว ดังนั้นถ้าต้องการการได้เปรียบเชิงกลในการขันสกรูหรือให้เกิดการยึดติดที่เสถียร ต้องเลือกสกรูที่ออกแบบให้เหมาะสมกับชนิดของงานด้วย

2.การวิเคราะห์แรงในขณะเกิดภาวะการยึดแบบสลักเกลียว

การยึดแบบสลักเกลียวมีลักษณะดังรูปที่ 4 เนื่องจากการยึดแบบนี้จะมีช่องว่างระหว่างสกรูกับรูของชิ้นงานที่ต้องการยึด ดังนั้นการกระจายแรงที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานและสลักเกลียวจึงเป็นสิ่งที่คาดคะเนได้ยาก ขึ้นกับความเที่ยงตรงของการผลิตชิ้นงานและสกรู แต่ในการวิเคราะห์นี้จะสมมุติให้มีการกระจายแรงที่สม่ำเสมอต่อชิ้นงาน (กิติ อินทรานนท์,2539)



รูปที่4 แสดงการยึดแบบสลักเกลียว

ที่มา: Joseph,E.S. Mechanical engineering design. 1st ed.(New York:Macgraw-Hill book company. 1986) , p 301.

Joseph(1986)อธิบายว่า เมื่อทำการขันสกรูเพื่อยึดชิ้นงานเข้าด้วยกันจะเกิดภาระกระทำก่อนในตัวสกรู และจากผลของภาระกระทำก่อนนี้จะทำให้ชิ้นงานนั้นเกิดการกดดันซึ่งกันและกัน และยังทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานที่ยึดกัน จึงสามารถต้านทานต่อแรงดึงจากภายนอกและแรงเฉือนที่เกิดขึ้น(P_s)ได้

จากการที่มีแรงดึงในสลักเกลียว ตัวสกรูจึงทำตัวเสมือนเป็นสปริงซึ่งมีค่าคงที่ของสปริงดังนี้

$$K=F/\delta$$

เมื่อ F =แรงที่มีในตัวสกรู

δ =การเปลี่ยนรูป=FL/AE

ดังนั้น K =AE/L

A =พื้นที่ตามเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ของสกรู

E =โมดูลัสยืดหยุ่น

L =ความหนาของชิ้นงานทั้งหมดที่ถูกยึดเข้าด้วยกัน

ซึ่งค่าคงที่ของสปริงจะนำมาใช้คำนวน ภาระงานดึงของสลักเกลียว(tension-load bolt connection)

เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อชิ้นงาน จะเกิดการเปลี่ยนรูปของสลักเกลียวและชิ้นงานที่ถูกยึด โดยสลักเกลียวจะมีความดึงตัวและยาวขึ้น ดังสมการ

$$\Delta\delta = P_b/K_b$$

และชิ้นงานที่ถูกยึดกันจะมีการกดคันลดลงดังสมการ

$$\Delta\delta = P_m/K_m$$

เมื่อกำหนดให้ P =แรงภายนอกทั้งหมดที่กระทำต่อชิ้นงานที่ยึดกัน

F_i =ภาระกระทำก่อนในสลักเกลียวอันเนื่องมาจากการขันสกรู และเป็นค่าที่มีมาก่อนที่ Pจะมากระทำ

P_b =ส่วนหนึ่งของ Pที่กระทำต่อสลักเกลียว

P_m = ส่วนหนึ่งของ Pที่กระทำต่อชิ้นงานที่ยึดกัน

F_b =ผลลัพท์ของแรงที่มีต่อสลักเกลียว

F_m =ผลลัพท์ของแรงที่มีต่อชิ้นงานที่ถูกยึด

ถ้าหากชิ้นงานที่ถูกแรง P มากระทำ ไม่ได้แยกออกจากกัน การเปลี่ยนรูปที่เพิ่มขึ้นของสลักเกลียวต้องเท่ากับ การเปลี่ยนรูปที่ลดลงของชิ้นงานที่ถูกยึด ดังนั้น

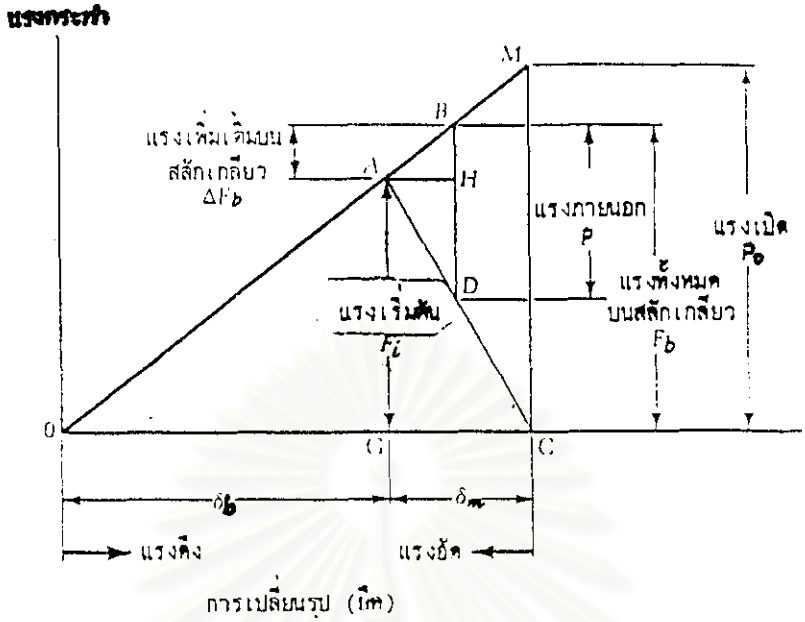
$$P_b/K_b = P_m/K_m \quad \text{และ } P = P_b + P_m$$

จะได้ว่า $P_b = \dfrac{K_b P}{K_b + K_m}$

ดังนั้น ผลลัพท์ของแรงที่มีต่อสลักเกลียว $F_b = P_b + F_i = \dfrac{K_b P}{K_b + K_m} + F_i$ สมการ2

ผลลัพท์ของแรงที่มีต่อชิ้นงานที่ยึดกัน $F_m = \dfrac{K_m P}{K_b + K_m} - F_i$ สมการ3

แสดงว่าเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อสลักเกลียว จะทำให้สลักเกลียวได้รับแรงเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากภาระกระทำก่อน ดังสมการ 2 ในขณะที่ชิ้นงานได้รับแรงลดลง อย่างไรก็ตามภาวะเช่นนี้จะดำเนินต่อไปเรื่อยๆจนถึงจุดที่แรงภายนอกเกือบทำให้ชิ้นงานแยกออกจากกัน เมื่อชิ้นงานแยกออกจากกันแรงจากภายนอกทั้งหมดจะกระทำต่อสลักเกลียวอย่างเดียว ซึ่งสามารถอธิบายเหตุการณ์นี้ด้วย แผนภาพการวิเคราะห์ความหยุ่นของรอยต่อที่ใช้สลักเกลียว (กิติ อินทรานนท์, 2539)ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5แสดงการวิเคราะห์ความหยุ่นตัวของรอยต่อที่ใช้สลักเกลียว

ที่มา: กิตติ อินทรานนท์ , <u>การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องกลสำหรับช่างอุตสาหกรรม(หน่วย SI)</u> (กรุงเทพ: สำนักพิมพ์ยูไนเต็ดบุ๊คส์) , หน้า 96.

จากรูปที่5 เมื่อมีแรงภายนอก(P)มากระทำต่อรอยต่อสลักเกลียวๆจะยืดออกทำให้ δ_bเพิ่มขึ้นแต่ทำให้δ_mยุบตัวลดลง การเพิ่มขึ้นและลดลงของการเปลี่ยนรูปนี้จะมีระยะการยืดตัวเท่ากัน ดังนั้นถ้า Pเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การยุบตัวของชิ้นงานเนื่องจากการอัดตัวของสลักเกลียวและแป้นเกลียวจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงจุด M ซึ่งค่า P สูงมากจนกระทั่งไม่มีการอัดตัวที่รอยต่ออีกต่อไป ค่า P ที่จุดนี้เรียกว่า แรงเปิด(opening load)=P_o

จะเห็นได้ว่า แรงทั้งหมดที่กระทำต่อรอยต่อนั้นบางส่วนเป็นแรงจากภายนอก(P) บางส่วนเป็นแรงจากภายใน(F_i) ถ้านำมาวิเคราะห์ถึงการหลวมของสกรูของตัวหลักภายหลังจากที่ผู้ป่วยใช้ฟันปลอมไประยะหนึ่ง ก็คงเนื่องมาจากสาเหตุที่แรงภายนอกซึ่งได้แก่แรงบดเคี้ยว(P)เมื่อรวมกับแรงภายใน(F_i)มีค่ามากพอที่จะเป็นแรงเปิด ทำให้ตัวหลักขยับจากตัวรากเทียม หรืออาจกล่าวได้ว่า แรงภายนอกรวมกับภาระกระทำก่อนมีค่ามากกว่าจุดคลากของสกรู ทำให้คุณสมบัติการคืนตัวเนื่องจากความยืดหยุ่นของสกรูหมดไป เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก(plastic deformation) การยึดติดแบบสลักเกลียวก็จะหมดไป(Burguetและคณะ,1994)

จากความรู้เรื่องการยึดติดด้วยสลักเกลียวนี้ สามารถนำมาวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นในตัวสกรู เมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อตัวหลักที่ยึดติดกับตัวรากเทียมดังต่อไปนี้

เมื่อทำการขันสกรูจนเกิดการยึดติดระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมแบบตึงแน่น(snug type) ทุกๆส่วนที่มาสัมผัสกันจะแนบสนิทกัน สกรูหรือสลักเกลียวจะมีความสามารถต้านทานแรงจากภายนอกที่พยายามทำให้ส่วนประกอบที่ยึดกันแยกจากกัน ดังนั้นเมื่อมีแรงบิด(torque) มากระทำต่อสกรู จะเกิดการต้านทานต่อแรงนี้ด้วยภาระกระทำก่อนของสกรูและแรงกดดันที่ทำให้ตัวหลักยึดกับตัวรากเทียม รวมทั้งต่อต้านโดยแรงเสียดทานที่อยู่ใต้หัวของสกรูและในเกลียวสกรู(Burgueteและคณะ, 1994) ก่อให้เกิดแรงบิดโต้ตอบ(reactive torque)ในส่วนใต้หัวสกรู(H) และในส่วนเกลียวที่ยึดกัน(R)(Burgueteและคณะ,1994) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R = T - H \qquad \text{สมการ4}$$

เมื่อT =แรงบิดภายนอกที่มากระทำ

แต่เนื่องจาก อัตราส่วนของ RและHมีความแปรปรวนจากหลายๆ ปัจจัย ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะคำนวนหาแรงบิดที่ต้องใช้เพื่อก่อให้เกิดภาระกระทำก่อนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (optimum preload) อย่างไรก็ตามถ้าหากต้องการให้การยึดติดมีประสิทธิภาพมากที่สุดแล้ว แรงที่ขันสกรูต้องมากกว่าแรงภายนอกที่คาดว่าจะมากระทำต่อระบบในระหว่างการใช้งาน ซึ่งความแข็งแรงของส่วนประกอบต่างๆของระบบก็มีส่วนส่งเสริมประสิทธิภาพของการยึดติดด้วย เช่น ความแข็งผิวของโลหะ ลักษณะทางเรขาคณิตของสกรู ตัวหลัก และตัวรากเทียม รวมทั้งต้องเข้าใจเรื่องแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขบวนการขันสกรูด้วย(Carrและคณะ,1996)

ดังที่ทราบแล้วว่า ยิ่งภาระกระทำก่อนของสกรูมีมากเท่าใด การยึดติดของรอยต่อก็ยิ่งมีความเสถียรมากขึ้นเท่านั้น(Burgueteและคณะ1994,Binon1994) แต่ในทางทันตกรรมรากเทียม การให้แรงเพื่อหมุนสกรูของตัวหลักเป็นลักษณะแรงบิด ในขณะที่ภาระกระทำก่อนเป็นแรงดึงที่เกิดภายในตัวสกรู ซึ่ง แรงบิด และ ภาระกระทำก่อนเป็นเพียงสัดส่วนโดยอ้อมซึ่งกันและกัน เนื่องจากยังมีปัจจัยร่วมที่มีผลต่อความสัมพันธ์นี้ เช่น แรงบิดเสียดทานใต้หัวสกรู ดังสมการ4 ซึ่งความสัมพันธ์ของแรงบิดโต้ตอบที่เกลียวสกรู(R) กับ ภาระกระทำก่อน จะมากน้อยเพียงใดขึ้นกับอีกหลายๆปัจจัยเช่น สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน ลักษณะทางเรขาคณิตของเกลียว และคุณสมบัติของวัสดุ แต่ปัจจัยที่มีความสำคัญค่อนข้างมากก็คือ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานซึ่งสัมพันธ์กับความแข็งผิวของเกลียว ความเรียบของเกลียว ปริมาณและคุณภาพของการหล่อลื่นของเกลียว และความเร็วในการขันสกรู ถึงแม้ว่าในขั้นตอนการผลิตจะสามารถควบคุมความแข็งผิวของเกลียว และความเรียบของเกลียวได้ ซึ่งพบว่า สัมประสิทธิ์ของแรง

เสียดทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อความแข็งผิวและความขรุขระเพิ่มขึ้น แต่เป็นการยากที่จะควบคุมการหล่อลื่นและความเร็วในการขันสกรู แม้ว่าจะมีการใช้เครื่องควบคุมแรงบิดด้วยไฟฟ้า(electronic or power torque controller) เพื่อช่วยควบคุมความเร็วในการขันสกรู แต่พบว่ายังมีข้อจำกัดในการใช้งาน

เกี่ยวกับคุณภาพและสถานะการหล่อลื่นระหว่างเกลียวของตัวรากเทียม กับ เกลียวสกรูของตัวหลัก พบว่าเป็นสิ่งที่คาดเดาได้ยาก นอกจากจะต้องปราศจากการหล่อลื่นโดยสิ้นเชิง ซึ่งหมายความว่า เกลียวของรากเทียมและเกลียวของสกรูต้องแห้งสนิทเมื่อยึดกัน แต่ในทางปฏิบัติเป็นสิ่งที่ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากในช่องปากมีน้ำลาย และยังพบอีกว่ายิ่งปริมาณการหล่อลื่นมีมาก สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานจะลดลง(Burgueteและคณะ,1994) ด้วยข้อจำกัดที่กล่าวมาจึงพบเสมอว่า ภาระกระทำก่อนที่ได้จากการขันสกรูด้วยเครื่องมือขันแน่นทั่วๆไปจะมีค่าเพียง 70-80%ของจุดครากของสกรู และต่ำกว่าภาระกระทำก่อนที่สูงสุดที่สกรูสามารถทนได้ (Pattersonและ John,1992) ซึ่งHaackและคณะ(1995)พบเช่นเดียวกันว่าแรงเค้นที่คำนวณได้จากการขันสกรูของตัวหลักที่ทำจากโลหะทองผสม หรือ ไททาเนียม ด้วยการใช้แรงขันสูงสุดตามที่กำหนดไว้สำหรับโลหะแต่ละชนิดมีค่าน้อยกว่า 60%ของความแรงจุดคราก(yield strength)

Burgueteและคณะ(1994)ได้ทำการวิเคราะห์บริเวณจุดใดจุดหนึ่งของปีกเกลียว(flanks)ของสกรู พบว่า แรงเสียดทาน(F)จะสัมพันธ์กับแรงสัมผัส(contact force,N)ดังสมการ

$$F = \mu N \qquad \text{สมการ5}$$

ซึ่งแรงเสียดทานจะเท่ากับ แรงบิด(t)ที่กระทำตามแนวแกนสกรู

และถ้า $t = F.r$ สมการ6

เมื่อ r เป็นระยะทางจากแนวแกนของสกรูมายังจุดกึ่งกลางที่แรงกระทำ(เท่ากับรัศมีพิตช์ของเกลียว)ดังรูปที่ 6.1

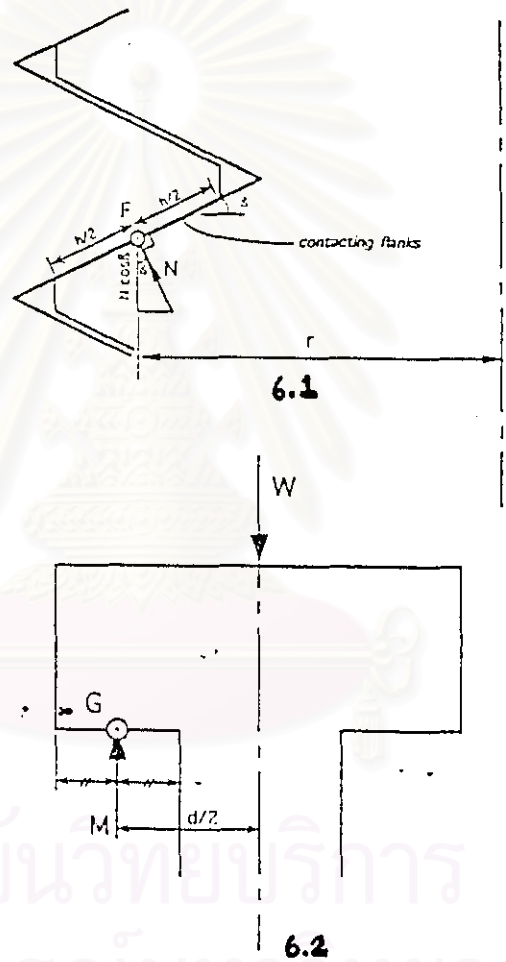
ดังนั้นผลรวมของ t ทุกๆจุดตลอดเส้นเกลียว หรือ เฮลิค(helix) จะเท่ากับ แรงบิดของเกลียว (R) ในลักษณะเดียวกัน ค่าแรงสัมผัส(N)เมื่อคำนวนให้อยู่ในแนวเดียวกับแนวแกนของสกรู แล้วหาผลรวมตลอดเส้นเกลียว ก็จะได้เป็นค่าของภาระกระทำก่อน ดังนั้น

$$P = \sum N \cos\beta \qquad \text{สมการ7}$$

จากสมการ5,6 จะได้ $R = \sum(r.\mu N)$ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเกลียว(R)กับภาระกระทำก่อน(P)คือ

$$P = \left(\frac{\cos \beta}{r \cdot \mu} \right) .R \qquad \text{สมการ8}$$

เมื่อ β เป็นครึ่งของมุมเกลียว,μคือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน



รูปที่ 6 แสดงแนวแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการขันสกรูบริเวณเกลียวสกรู(1)หัวสกรู(2)

ที่มา: Burguette,R.L.;John,R.B.;King,T;and Patterson,E.A. Tightening characteristics for screwed joints in osseointegrated dental implants. J Prosthet Dent71(June 1994) ,p 594.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการ8 เป็นการยืนยันให้เห็นว่าลักษณะทางเรขาคณิต เช่น การเปลี่ยนรัศมีเกลียวสกรู และรูปร่างของสกรู มีผลต่อความสัมพันธ์นี้ ดังนั้นสกรูที่ออกแบบต่างกันจะมีความสัมพันธ์ของภาระกระทำก่อนและแรงบิดที่ต่างกันด้วย อย่างไรก็ตามสมการนี้เป็นเพียงความสัมพันธ์อย่างคร่าวๆเนื่องจากมีการใช้ค่าคุณสมบัติของวัสดุบางส่วน เช่น สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน(μ) ในสมการเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้ว ขณะที่มีแรงภายนอกมากระทำต่อระบบนั้น เกลียวจะมีการเปลี่ยนรูป ทำให้ค่า r, βของเกลียวเปลี่ยนไป จะมากน้อยเท่าใดขึ้นกับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ค่าอัตราส่วนเปียร์ซอง(poisson ration) และแรงเค้นจุดคราก(ของวัสดุ ซึ่งการเปลี่ยนรูปจะมีทั้งที่เป็นการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น(elastic deformation)ซึ่งเกิดขึ้นทั่วๆไปและมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเฉพาะตำแหน่ง เช่น บริเวณรากเกลียว

ส่วนการวิเคราะห์แรงบิดใต้หัวสกรู(H)มีลักษณะเช่นเดียวกัน ดังรูป 6.2 ดังนั้นแรงเสียดทานใต้หัวสกรูจะเท่ากับแรงบิดใต้หัวสกรู $H = G.d/2$ สมการ9

สมมุติให้แรงสัมผัสใต้หัวสกรูกระจายสม่ำเสมอ ดังนั้น

$$G = \mu_H M \qquad \text{สมการ10}$$

เมื่อทำให้แรงอยู่ในแนวแกนสกรูจะได้

$$M = W + P \qquad \text{สมการ11}$$

W คือแรงกระทำตลอดความยาวของสกรูในช่วงที่มีการขันสกรู

เมื่อรวมสมการ 10,11จะได้ $H = \mu_H(W + P) \cdot d/2$ สมการ12

ซึ่งค่าแรงบิดใต้หัวสกรูจะแปรตาม แรงเสียดทาน รูปทรงทางเรขาคณิต และคุณสมบัติของวัสดุ เมื่อรวมสมการ4,8,12จะได้

$$T = \left(\frac{r\mu}{\cos\beta} \right) \cdot \frac{P + \mu_H(W+P)d}{2} \qquad \text{สมการ13}$$

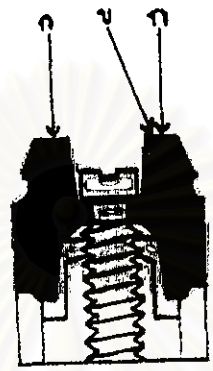
สมการนี้ใช้ได้ดีในกรณีที่มีการกระจายของภาระงานค่อนข้างสม่ำเสมอและรูปทรงทางเรขาคณิตของสกรูไม่ซับซ้อน ดังนั้นถ้าใช้สมการนี้เพื่อหาค่าแรงบิด และภาระกระทำก่อน จะต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง(Burguete และคณะ,1994) เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการคำนวณ

ถ้าทำการพิจารณาแรงเค้นสะสมที่เกลียวสกรูพบว่า บริเวณที่มักจะเกิดความล้มเหลวเนื่องจากความล้ามีอยู่ 2แห่ง ซึ่งได้แก่ รอยต่อบริเวณก้านสกรู(shank)กับหัวสกรู ในบริเวณนี้แรงเค้นสะสมจะมากหรือน้อยขึ้นกับ อัตราส่วนเส้นผ่าศูนย์กลางของภาคตัดขวางของสกรู กับรัศมีใต้หัวสกรูที่เรียกว่ารัศมีฟิลเลต(fillet) แต่บริเวณที่มักจะมีแรงเค้นสะสมสูงสุดคือรากเกลียวแรก

ซึ่งมีภาระงานมากระทำมากที่สุด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากลักษณะทางเรขาคณิตของเกลียวทำให้เกิดการสะสมของแรงตำแหน่งนี้ของทุกๆเกลียว และบางส่วนอาจจะเนื่องมาจากการสะสมของภาระงานที่มากระทำต่อเกลียวแรกของสกรู(Pattersonและคณะ,1992) จะเห็นว่าการออกแบบส่วนหัวของสกรูและลักษณะทางเรขาคณิตของเกลียว นอกจากจะมีผลต่อความสัมพันธ์ของภาระกระทำก่อน กับแรงบิดของเกลียวสกรูแล้ว(ดังอธิบายโดยสมการ 8)ยังมีผลต่อความล้าของสกรู นอกจากนี้มันยังมีผลต่อความเสถียรของการยึดติดอีกด้วย ดังรายงานของ Jemและคณะ (1990)ที่พบเสมอว่าในช่วงแรกๆของการใช้ฟันปลอมชิ้นเดี่ยวๆที่ยึดติดกับรากเทียมระบบ Branemarkมักมีการหลวมของสกรูเสมอ และสกรูที่ใช้ส่วนใหญ่มีการออกแบบหัวสกรูเป็นลักษณะกรวย(conical screw) เมื่อ Jorneusและคณะ(1992)ใช้สกรูที่มีหัวแบนเรียบแทนสกรูแบบเดิม พบว่าการหลวมของสกรูลดลง ผู้ทดลองให้เหตุผลว่าสกรูที่มีหัวเป็นลักษณะกรวยจะสูญเสียแรงบิดจำนวนมากเพื่อเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างหัวสกรูกับตัวหลัก ทำให้มีแรงไปสู่เกลียวลดลง ความเสถียรก็จะลดลงด้วย

ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นการวิเคราะห์แรงในขณะที่ทำการขันสกรู แต่สิ่งที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากันก็คือ การวิเคราะห์แรงของสกรูเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำซึ่งจะมีทั้งชนิดที่เป็น แรงกด แรงดึง แรงเฉือน แรงกระทำซ้ำๆ และแรงเหล่านี้รวมกัน เมื่อมีแรงดึงมากระทำต่อส่วนประกอบของฟันปลอมเช่น กระทำต่อตัวหลัก แรงบางส่วนจะทำให้เกิดการปลดปล่อยแรงกดดันของส่วนที่ยึดกัน ในขณะที่บางส่วนจะเพิ่มแรงยึดในตัวสกรู(Pattersonและ John1992) ซึ่งสามารถคำนวณภาระงานที่ตัวสกรูต้องรับเพิ่ม และภาระงานที่ส่วนประกอบที่ยึดกันได้รับลดลงโดยใช้ สมการ 2และ3 เมื่อแรงดึงมีปริมาณเพิ่มเรื่อยๆจนเท่ากับแรงเปิด ตัวหลักจะไม่ยึดกับตัวรากเทียมและภาระกระทำก่อนในตัวสกรูจะหมดไปด้วย ในทางตรงกันข้ามถ้าหากมีแรงกดมากระทำต่อด้านบนของตัวหลักตามแนวแกนของสกรูดังรูป 7(ก) จะทำให้ตัวหลักมีโอกาสเกิดการยุบตัว การสัมผัสของหัวสกรูกับตัวหลักก็จะลดลง เมื่อแรงกดมีค่าเพิ่มขึ้นในระดับที่ทำให้ส่วนบนของตัวหลักไม่สัมผัสกับหัวสกรูแล้ว ภาระกระทำก่อนในตัวสกรูก็จะหมดไป หรือในกรณีที่แรงกดมากระทำต่อด้านบนของตัวหลักอยู่นอกแนวแกนสกรูดังรูป 7(ข) ตัวหลักด้านที่รับแรงจะพยายามหมุน โดยมีรอยต่อระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมทำตัวเสมือนเป็นจุดหมุน ทำให้ด้านบนของตัวหลักด้านที่รับแรงเกิดการยุบตัวและไม่สัมผัสกับหัวสกรู ในขณะที่ตัวหลักด้านตรงข้ามจะสัมผัสกับหัวสกรูเพิ่มขึ้น ถ้าเกิดเหตุการณ์เช่นนี้สลับไปมาและซ้ำๆจะทำให้สกรูหลวมในที่สุด(Sakaguchiและ Borgerson,1993) ซึ่งตรงกับการอธิบายของRangertและคณะ (1989)เกี่ยวกับ แรง และ โมเมนต์ที่กระทำต่อตัวรากเทียมโดยใช้ลักษณะกระดานหก(see-saw)

ที่อธิบายว่า ถ้าหากผลรวมของแรงที่กระทำอยู่นอกแนวแกนของสกรูแล้วจะทำให้เกิดผลเสียต่อการยึดติด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองJorneusและคณะ(1992)



รูปที่ 7 แสดงทิศทางแรงกดที่กระทำต่อด้านบนของตัวหลัก ก.ตามแนวแกนสกรู
ข.นอกแนวแกนสกรู

จะเห็นได้ว่า กลไกการยึดติดระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมด้วยสกรูมีความสลับซับซ้อน มีปัจจัยหลายๆประการเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเฉพาะสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน(Carrและคณะ 1996) คุณสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าจุดครากของโลหะที่ประดิษฐ์สกรู(Andersonและคณะ1992) การออกแบบหัวสกรู และรูปทรงทางเรขาคณิตของสกรู อย่างไรก็ตามสิ่งที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นสภาวะในอุดมคติซึ่งส่วนประกอบต่างๆที่นำมายึดติดกันมีความแนบสนิทอย่างเที่ยงตรงและแม่นยำ แต่ในทางปฏิบัติมักจะมีความคลาดเคลื่อนของส่วนประกอบที่นำมายึดติดกันทำให้เกิดความไม่แนบสนิท ส่งผลให้ภาระกระทำก่อน และความเสถียรของการยึดติดลดลง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

ปัจจัยที่มีผลต่อความแนบสนิทและความเสถียรระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมที่ใช้การยึดแบบสลักเกลียว

จากความรู้เรื่องกลไกการยึดแบบสลักเกลียว ถ้าหากต้องการให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการยึดตัวหลักเข้ากับตัวรากเทียมแล้ว ส่วนประกอบทั้งสองจะต้องยึดกันอย่างมั่นคงเสมือนเป็นชิ้นเดียวกัน ซึ่งภาวะเช่นนี้จะเกิดได้ต่อเมื่อตัวหลักต้องมีความแนบสนิทอย่างแม่นยำกับตัวรากเทียมโดยมีสกรูดึงส่วนประกอบทั้งสองให้ยึดกัน จึงจะทำให้ต้านทานต่อการหมุนหรือการขยับของตัวหลักและก่อให้เกิดความเสถียรของรอยต่อ(Binon,1994) ส่งผลให้สกรูหลวมได้ยากขึ้น ทำให้มีผลดีต่อการกระจายแรง ทั้งในกรณีที่เป็นฟันปลอมซี่เดียว หรือฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียมหลายๆตัว(Brunski,1994) แต่ในความเป็นจริงกลับพบว่า มีความแปรปรวนของความแนบสนิทระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมค่อนข้างสูง คือมีค่าตั้งแต่ 20-26ไมโครเมตร (Binonและคณะ,1992) 10-15 ไมโครเมตร(Binon,1996) 10 ไมโครเมตร(Suttlerและคณะ,1993) และมีค่าน้อยกว่า 10ไมโครเมตร(Jansenและคณะ,1997) ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ อันได้แก่ ความเที่ยงตรง แม่นยำ ความเข้ากันได้และการออกแบบส่วนประกอบที่นำมายึดกัน ปริมาณแรงที่ใช้ขันสกรู ความเที่ยงตรงและความแม่นยำของวิธีการวัดตลอดจนถึงความละเอียดของเครื่องมือที่ใช้วัด ความเรียบของพื้นผิวที่นำมายึดกัน และอายุความล้าของสกรู ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

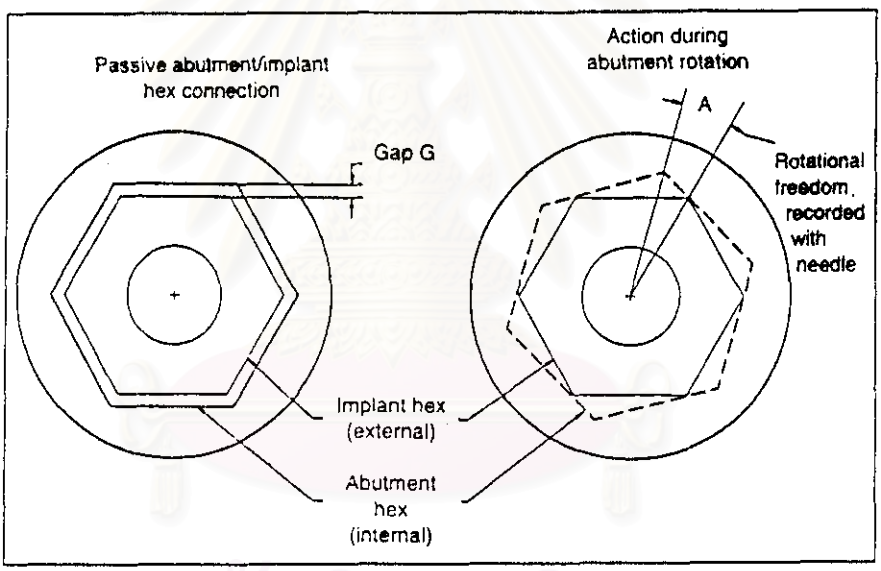
ปัจจัยประการแรก คือ ความเที่ยงตรง แม่นยำ ความเข้ากันได้ และการออกแบบส่วนประกอบที่นำมายึดกัน Binon(1994)กล่าวว่าความเที่ยงตรง แม่นยำ และความเข้ากันได้จะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีความคลาดเคลื่อนของการผลิตน้อยที่สุด ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆของรากเทียมมีความเที่ยงตรงและความคงที่สูงเนื่องจากได้มีการใช้คอมพิวเตอร์มาควบคุมการทำงานของเครื่องจักรในการผลิต ทำให้ความคลาดเคลื่อนในการผลิตมีเพียง 3-5 ไมโครเมตรเท่านั้น อย่างไรก็ตามภายหลังจากการผลิตชิ้นส่วนจำนวนมากๆ เครื่องมือตัด (cutting tool)ที่ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์(tungstain carbide)จะทื่อ และต้องมีการเปลี่ยนอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งอายุการใช้งานจะนานเท่าใดขึ้นกับชนิดของวัสดุที่นำมาผลิตชิ้นส่วน แต่ถ้าเครื่องมือตัดไม่ได้รับการเปลี่ยนตามเวลาที่กำหนดจะทำให้ความเที่ยงตรงและความคงที่ในการผลิตลดลง ชิ้นส่วนต่างๆที่ผลิตได้จะไม่มีความแม่นยำในการนำมายึดติด ก่อให้เกิดความแปรปรวนของความแนบสนิทขึ้น นอกเหนือจากการผลิตชิ้นส่วนด้วยการกลึงแล้ว ยังสามารถใช้วิธีการหล่อโลหะในการผลิตได้ แต่พบว่าวิธีการนี้ไม่ค่อยมีความเที่ยงตรงเท่าที่ควร ต้องมีการขัดแต่ง

หรือใช้การกลึงด้วยมือร่วมกับการใช้ครีมขัดกากเพ็ชรหรืออลูมิเนียมออกไซด์(abrasive diamond or aluminium oxide pastes)ช่วย เพื่อทำให้ได้ขนาดและความเรียบของผิวตามต้องการ

ชนิดของวัสดุที่นำมาผลิตก็มีผลอย่างมากต่อความเที่ยงตรงของการผลิตด้วยเช่นกัน พบว่าโลหะและเซรามิก(ceramic)สามารถกลึงให้มีความเที่ยงตรงได้ง่ายกว่าวัสดุจำพวกพลาสติก เนื่องจากพลาสติกมีการบิดงอในขณะที่ทำการกลึง (English,1994) ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุ วิธีการผลิตที่เหมาะสม รวมทั้งการควบคุมคุณภาพการผลิต(quality control)ของบริษัท จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความแม่นยำและความเข้ากันได้ของชิ้นส่วนต่างๆของรากเทียมที่นำมายึดติดกัน

จากการสำรวจส่วนแบ่งการตลาดของรากเทียมมากกว่า 45 ระบบพบว่า รากเทียมชนิด ช่วงต่อยอดชนิดหกเหลี่ยมซึ่งเป็นการออกแบบที่เหมือนกับรากเทียมระบบBranemarkรุ่นใหม่ เป็นระบบที่ใช้เป็นมาตราฐานในปัจจุบัน(Binon,1996) ซึ่งวัตถุประสงค์ในช่วงแรกๆของการมีส่วนหกเหลี่ยมยื่นออกมาจากตัวรากเทียม เพื่อใช้เป็นกลไกในการส่งถ่ายแรงบิดให้ตัวรากเทียมหมุนเข้าไปยังร่องกระดูกที่เตรียมไว้ในขณะทำศัลยกรรมฝังรากเทียม แต่ต่อมาพบว่าส่วนเหลี่ยมนี้มีประโยชน์ในการเป็นดรรชนี(index)ของการใส่ตัวหลักเข้ากับตัวรากเทียม และป้องกันการหมุน(antirotation)ของตัวหลักบนตัวรากเทียมได้(Beaty,1994) ดังนั้นความแนบสนิทอย่างแม่นยำและความเข้ากันได้ของส่วนที่เป็นเหลี่ยมด้านนอกของตัวรากเทียม(external hex) กับส่วนที่เป็นเหลี่ยมด้านในของตัวหลัก(internal hex)จึงมีผลอย่างยิ่งต่อความแนบสนิทของรอยต่อ จากการศึกษาของBinon(1995)เกี่ยวกับความแม่นยำและความเที่ยงตรงในการผลิตส่วนประกอบต่างๆของรากเทียมจำนวน 13ระบบ ซึ่งได้ทำการวัดขนาด ความกว้าง ความยาว และความสูงของเหลี่ยมด้านนอกของตัวรากเทียมและเหลี่ยมด้านในของตัวหลัก พบความคลาดเคลื่อนของการผลิตของส่วนกว้างมีค่า1-27ไมโครเมตร และของส่วนสูงมีค่า18-147ไมโครเมตร แสดงให้เห็นว่ามีความแปรปรวนในการผลิตค่อนข้างสูง ยิ่งมีช่องว่างระหว่างเหลี่ยมด้านนอกของตัวรากเทียมกับเหลี่ยมด้านในของตัวหลักมากเท่าใด ตัวหลักก็มีความอิสระของการหมุนมากเท่านั้น เนื่องจากพื้นผิวแต่ละด้านของเหลี่ยมไม่ได้แนบกันเพื่อต่อต้านการหมุน จากการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนในส่วนเหลี่ยมของตัวหลักกับตัวรากเทียม ภายหลังจากการให้แรงซ้ำๆกระทำต่อตัวหลักจนเกิดการหลวมของสกรู พบว่าตัวหลักที่มีค่าความอิสระของการหมุนสูงจะมีการเปลี่ยนรูปและเกิดการมนของส่วนที่เป็นมุมของเหลี่ยมด้านนอกของตัวรากเทียม แต่กลับไม่ปรากฏร่องรอยการเสียดสีของพื้นผิวแต่ละด้านของเหลี่ยมเลย แสดงว่าเมื่อเกิดการหมุนของตัวหลัก ส่วนมุมของเหลี่ยมด้านนอกของตัวรากเทียมจะเป็นตัวที่สัมผัสกับพื้นผิวของเหลี่ยม

ด้านในของตัวหลักและยับยั้งการหมุนไว้ ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากเป็นการสัมผัสแบบจุด (point contact) ในขณะที่ตัวหลักที่มีความอิสระของการหมุนต่ำกลับพบว่าพื้นผิวแต่ละด้านของเหลี่ยมด้านนอกของตัวรากเทียมและเหลี่ยมด้านในของตัวหลักมีร่องรอยการเสียดสี แต่ส่วนมุมของเหลี่ยมด้านนอกของตัวรากเทียมยังคงความคมเหมือนเดิม ชี้ให้เห็นว่าเมื่อตัวหลักเริ่มมีการหมุน ส่วนพื้นผิวแต่ละด้านของเหลี่ยมจะต้านทานการหมุนทันทีเพราะมีการสัมผัสกันอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการหมุนได้สูงเนื่องจากเป็นการสัมผัสแบบพื้นผิวต่อพื้นผิว ยิ่งพื้นผิวแต่ละด้านของเหลี่ยมที่สัมผัสกันกว้างมากเท่าใด ความต้านทานต่อการหมุนก็มากเท่านั้น ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงความแนบสนิทของเหลี่ยมด้านในของตัวหลัก กับเหลี่ยมด้านนอกของตัวรากเทียม มีผลต่อความสามารถต้านทานการบิดหมุนของตัวหลักได้ โดย Gap G เป็นระยะห่างระหว่างผิวด้านในของตัวหลัก กับผิวด้านนอกของตัวรากเทียม

ที่มา: Binon ,P. Evaluation of machining accuracy and consistency of selected implants, standarad abutments,and laboratory analogs. Int J Prosthodont8(1995) ,p 164.

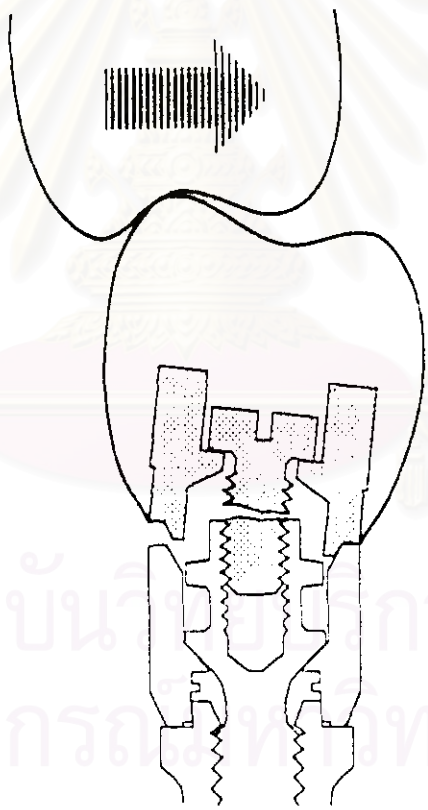
ผู้ทดลองยังพบอีกว่า ความต้านทานต่อการหมุนของตัวหลักจะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าความอิสระของการหมุนมีค่าต่ำกว่า 2องศา แต่ถ้าเมื่อใดก็ตามที่ค่าความอิสระของการหมุนมีค่าสูงกว่า 5 องศาแล้ว ความต้านทานต่อการหมุนจะลดลงถึง 63% นอกจากนี้ความสูงของส่วนเหลี่ยมก็มีผลต่อความเสถียรของการยึดติดโดยที่ความสูงที่น้อยที่สุดของส่วนเหลี่ยมจะต้องมากกว่า 1.2ม.ม. จึงจะมีความสามารถต้านทานต่อการหมุนได้ดี

อย่างไรก็ตามถ้าส่วนเหลี่ยมที่นำมายึดกันมีความแนบสนิทกันมากเกินไปจนไม่สามารถใส่ตัวหลักให้เข้าที่กับตัวรากเทียมแล้วก็อาจพบว่ามีช่องว่างบริเวณรอยต่อในแนวดิ่งได้ ดังที่ Binon(1995)พบว่า รากเทียมระบบScrew Vent ซึ่งมีค่าความอิสระของการหมุน 1.4องศา แต่กลับไม่สามารถใส่ตัวหลักให้แนบสนิทกับตัวรากเทียมในแนวดิ่งได้ จึงทำให้มีช่องว่างระหว่างรอยต่อถึง 45ไมโครเมตร ความไม่แนบสนิทนี้นอกจากจะเป็นแหล่งที่สะสมเชื้อแบคทีเรียแล้วยังมีผลต่อ ภาระกระทำก่อนของตัวสกรูอีกด้วย

นอกจากส่วนเหลี่ยมของตัวรากเทียมจะมีผลต่อความแนบสนิทแล้ว การออกแบบพื้นผิวสัมผัสของบริเวณที่นำมาแนบกันก็มีผลต่อความแนบสนิทด้วย ดังเช่น รากเทียมระบบ Implant Innovationที่ออกแบบขอบล่างของตัวหลักต่อยอดมีลักษณะแบนราบในบริเวณขอบด้านนอก แต่เป็นระนาบเอียง(bevel)บริเวณขอบด้านใน เมื่อทำการยึดตัวหลักต่อยอดนี้เข้ากับตัวหลักพบว่ามีช่องว่างของรอยต่อบริเวณขอบด้านนอกถึง 28-119 ไมโครเมตร(Binon,1992) ผู้ทดลองให้เหตุผลว่าระนาบเอียงของตัวหลักต่อยอดกับตัวหลักมีมุมที่ไม่สอดคล้องกัน เมื่อทำการขันสกรูบริเวณเหล่านี้จะขัดขวางการเข้ามาแนบกันของขอบด้านนอก จึงทำให้เกิดช่องว่างในบริเวณนี้ได้ นอกจากนี้ Jaarda,RazoogและGratton(1994)ได้ให้ข้อคิดเห็นเกี่ยวกับลักษณะการยึดติดแบบนี้ว่ามีความต้านทานต่อแรงในแนวระนาบต่ำ เนื่องจากเมื่อมีแรงในแนวระนาบมากระทำต่อตัวหลักต่อยอด ตัวหลักต่อยอดด้านที่รับแรงจะพยายามขยับตัวออกจากตัวหลักโดยมีรอยต่อระหว่างตัวหลักต่อยอดกับตัวหลักด้านตรงกันข้ามเป็นจุดหมุน แต่เนื่องจากผนังที่เป็นส่วนสัมผัสระหว่างตัวหลักต่อยอดและตัวหลักมีความสูงในแนวดิ่งไม่มากพอที่จะต้านทานแรงยกตัวของตัวหลักต่อยอดได้ สกรูของตัวหลักต่อยอดจึงต้องรับแรงเกือบทั้งหมดและมีโอกาสหักได้ในที่สุด(ดังรูป 9)

ส่วนSutlerและคณะ(1992)ได้กล่าวถึงรากเทียมระบบ ITI (Institute Strauma AG, Waldenberg,Switzerland)ชนิดขั้นตอนเดียว(one-stage or nonsubmerge)ซึ่งได้ออกแบบตัวหลักให้มีเป็นลักษณะทรงกรวยที่มีความสอบ 8องศา ส่วนปลายมีสกรูยื่นออกมา(8-degree taper,

cone-to-screw base)และสามารถขันสกรูนี้เข้ากับส่วนบนของรากเทียมที่เป็นเบ้ารูปทรงกรวยมีผนังผาย 8องศาได้อย่างพอดี โดยไม่ต้องใช้สกรูของตัวหลักที่แยกต่างหาก ผู้ทดลองพบว่าการที่ผิวสัมผัสมีลักษณะเช่นนี้ ทำให้รอยต่อของตัวหลักกับตัวรากเทียมเกิดความแนบสนิทเป็นผลให้ช่องว่างมีขนาดเล็กกว่า 10ไมโครเมตร ซึ่งเล็กกว่ารอยต่อของตัวหลักกับตัวรากเทียมที่เป็นมุมฉาก(butt joint) นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการสัมผัสกันบริเวณทรงกรวยจะดูดซับการสั่นสะเทือนและแรงจากภายนอกเสมือนเป็นกันชนป้องกันแรงเหล่านี้ลงไปสู่สกรูที่ยึดกับตัวรากเทียม ทำให้รอยต่อชนิดนี้มีความต้านทานต่อแรงหมุนและมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่ารากเทียมที่มีรอยต่อกับตัวหลักเป็นแบบมุมฉาก ซึ่งNorton(1997)ได้กล่าวถึงการทดลองของArvidsonและคณะ(1990,1992)ที่ทำในรากเทียมระบบAstra(Astra.techAB,Molndal,Sweden)ก็ให้ผลคล้ายคลึงกัน



รูปที่ 9 แสดง การยกตัวของตัวหลักต่อยอดเมื่อมีแรงในแนวระนาบมากระทำ

ที่มา: Jaarda,M.J.;Razzoog,M.E.;and Gratton,D.G. Effect of preload torque on the ultimate tensile strength of implant prosthetic retainning screws. Implant dent3 (spring,1994), p. 20.

ในขณะที่Binon(1996)ได้ประเมินคุณสมบัติเชิงกลของรากเทียมระบบSpline(Calcitex, Carlbod,CA)ซึ่งมีการออกแบบรอยต่อของผิวสัมผัสของตัวหลักที่นำมายึดกับตัวรากเทียมแตกต่างไปจากรากเทียมระบบอื่นๆ โดยระบบนี้จะมีการยึดติดของรอยต่อบริเวณขอบด้านนอกเป็นมุมฉาก แต่บริเวณขอบด้านในของทั้งตัวหลักกับตัวรากเทียมจะมีส่วนยื่นคล้ายฟัน(spline teeth) 6ซี่สลับกับร่อง 6ร่อง เมื่อนำตัวหลักมายึดกับตัวรากเทียม ส่วนฟันและส่วนร่องจะสบหว่างกันพอดี ทำให้รอยต่อแบบนี้มีความแข็งแรงต่อแรงบิด(torsional strength)ได้สูงถึง 219.7 นิวตัน/ซ.ม. ซึ่งมากกว่ารากเทียมระบบที่มีการยึดติดโดยใช้ช่วงต่อภายนอกหกเหลี่ยมถึง 17.1-89.2 % และส่วนฟันนี้ยังมีความแข็งแรงต่อแรงกดมากกว่าช่วงต่อภายนอกหกเหลี่ยม 3-5เท่า ในขณะที่ค่าอิสระของการหมุนของตัวหลักมีค่าน้อยมากคือ 0.267องศา และที่สำคัญก็คือมีความแนบสนิทของรอยต่อบริเวณขอบด้านนอกดีมาก กล่าวคือช่องว่างบริเวณรอยต่อมีความกว้างไม่เกิน 10-15ไมโครเมตร ดังนั้นนอกเหนือจากความแม่นยำและเที่ยงตรงในการผลิตส่วนประกอบต่างๆแล้ว การออกแบบส่วนประกอบเหล่านี้ก็มีผลต่อความแนบสนิทซึ่งเป็นสิ่งที่ทันตแพทย์ควรที่จะพิจารณาร่วมด้วย

ปัจจุบันได้มีหลายบริษัทที่ทำการผลิตส่วนประกอบต่างๆของรากเทียมลอกเลียนจากบริษัทต้นแบบ(Branemark)เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายของผู้ป่วย ซึ่งพบว่าบางบริษัทประสบความสำเร็จในการลอกเลียนแบบหรือมีความเที่ยงตรงในการผลิตเท่าๆกับบริษัทต้นแบบ โดยใช้การประเมินช่องว่างที่เกิดระหว่างรอยต่อของส่วนประกอบกับตัวรากเทียมเป็นตัวบ่งบอกถึงความสำเร็จ ดังเช่นการทดลองของBinon(1992) อย่างไรก็ตามการใช้ความแนบสนิทของรอยต่อเพียงอย่างเดียวเพื่อบ่งบอกถึงการเข้ากันได้ของส่วนประกอบของรากเทียม กับ ตัวรากเทียมที่ผลิตจากคนละบริษัทอาจจะไม่ถูกต้องเท่าที่ควร เนื่องจากภายในของตัวหลักอาจไม่แนบสนิทกับทุกๆส่วนของตัวรากเทียม ทำให้คุณสมบัติการต้านทานต่อการหมุนลดลง และอาจทำให้การกระจายแรงจากตัวหลักไปสู่ตัวรากเทียมไม่เป็นไปตามอุดมคติ ก่อให้เกิดแรงเค้นสะสมในบางตำแหน่งของรอยต่อได้ แต่สิ่งที่สำคัญไม่น้อยไปกว่ากันก็คือคุณสมบัติของโลหะที่นำมาผลิตส่วนประกอบนั้นๆมีความแข็งแรงเพียงพอหรือไม่ เนื่องจากการทดลองของMcGlumphy(1993)พบว่าการใช้ส่วนประกอบที่ผลิตจากต่างบริษัทกันจะมีผลต่อความต้านทานต่อการหักของรากเทียมที่ต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นการดีกว่าที่จะใช้ส่วนประกอบของรากเทียมที่ผลิตจากบริษัทเดียวกันเพราะว่ามีการควบคุมคุณภาพ และมาตราฐานในการผลิตในระดับเดียวกัน

สิ่งที่ทำให้ตัวหลักไม่แนบสนิทกับตัวรากเทียมอีกประการหนึ่งคือ เศษสกปรกตรงบริเวณรอยต่อ ซึ่งอาจทำให้สกรูของตัวหลักเกิดการเปลี่ยนรูป หรือเกิดการปีนเกลียวของสกรู ผลก็คือ

เกลียวของตัวหลักกับตัวรากเทียมมีการสัมผัสกันบางตำแหน่ง หรือ เกิดการสึกของเกลียว ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตของเกลียวและสกรูเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่มีจะผลต่อภาระกระทำก่อนของสกรู(Binon,1994) เพราะว่าแรงบิดของการขันสกรูส่วนหนึ่งจะถูกใช้เพื่อดึงส่วนที่ไม่แนบกันให้เข้ามาชิดกันทำให้ภาระกระทำก่อนลดลง อายุความล้าของสกรูก็จะลดลงส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานต่อแรงจากภายนอกที่จะมากระทำต่อระบบลดลงไปด้วย ดังนั้นเมื่อมีแรงภายนอกใดๆก็ตามที่มากระทำเพื่อแยกส่วนประกอบนี้ออกจากกัน แรงส่วนใหญ่จะทำให้เกิดการตึงตัวในสกรูแทนที่จะกระจายไปสู่ส่วนประกอบที่ถูกยึด เมื่อถึงจุดที่แรงภายนอกมีค่าสูงกว่าภาระกระทำก่อนของสกรูซึ่งมีค่าต่ำอยู่แล้ว รอยต่อจะขาดความเสถียรทันทีและสกรูก็จะหลวมในเวลาต่อมา

กลไกการหลวมของสกรูสามารถอธิบายได้เป็น 2ขั้นตอน(Bickford, 1981)ดังนี้ ขั้นแรกเมื่อมีแรงภายนอกเช่น แรงบดเคี้ยวมากระทำต่อฟันปลอม แรงนี้จะมีลักษณะทั้งตามขวางและตามแนวแกนสกรู ซึ่งก่อให้เกิดการลื่นไถลระหว่างเกลียวของสกรูกับเกลียวของตัวรากเทียม เป็นการทำลายภาระกระทำก่อนในตัวสกรูทีละเล็กทีละน้อย ในขั้นตอนนี้ยิ่งภาระกระทำก่อนของสกรูมีมากเท่าใด ความต้านทานต่อการหลวมของสกรูก็มีมากเท่านั้นเนื่องจากมีแรงบิดของเกลียว(R)สูง (ดัง สมการ8) ดังนั้นจึงต้องใช้แรงจากภายนอกจำนวนมากเพื่อทำให้เกิดการเลื่อนไถล แต่เมื่อใดก็ตามที่แรงภายนอกมีค่ามากกว่าภาระกระทำก่อนแล้ว รอยต่อจะเริ่มขาดความเสถียร ซึ่งในขั้นตอนที่ 2 แรงจากภายนอกนี้จะทำลายภาระกระทำก่อนที่เหลือในตัวสกรูอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนและการเคลื่อนขยับของรอยต่อ สกรูจะหลวมและหมุนย้อนกลับในที่สุด จากความรู้นี้ทำให้ทราบว่าความไม่แนบสนิทเป็นเสมือนตัวเร่งที่ทำให้สกรูหลวมได้ง่ายยิ่งขึ้น และถ้าส่วนเหลี่ยมด้านนอกของตัวรากเทียมไม่สามารถต้านทานการหมุนได้แล้วการยึดติดก็จะล้มเหลวในเวลารวดเร็ว ฉะนั้นความแนบสนิทจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการคงไว้ซึ่งความมั่นคงของการยึดติดระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียม ซึ่งสอดคล้องกับที่Kallusและ Bessing (1994) , Jemt(1990) และZarb(1990)ได้บันทึกเกี่ยวกับการหลวมของสกรูไว้

ปัจจัยประการที่สอง คือ ปริมาณของแรงที่ใช้ขันสกรู ดังได้กล่าวมาแล้วว่ายิ่งภาระกระทำก่อนในการยึดติดของตัวหลักกับตัวรากเทียมมีมากเท่าใด การยึดแน่นและความเสถียรของการยึดติดก็จะมากเท่านั้น ดังนั้นการขันสกรูด้วยแรงสูงสุดเท่าที่ตัวสกรู ตัวหลัก ตัวรากเทียม และกระดูกสามารถทนรับได้จึงมีความสำคัญต่อการยึดติด ซึ่งแทบทุกบริษัทจะกำหนดแรงขันสกรูมาให้อยู่แล้ว เช่นโลหะที่ทำจากไททาเนียมจะใช้แรงขัน 20นิวตัน/ซ.ม. ในขณะที่สกรูที่ทำจากโลหะทองผสมจะใช้แรงขัน 30นิวตัน/ซ.ม.(DellingsและCurtis,1996) โดยขึ้นกับการออกแบบ

ส่วนต่างๆของสกรู ความแนบสนิทของผิวโลหะ และคุณสมบัติของโลหะที่ใช้ผลิตสกรูซึ่งพอจะแยกออกเป็น 2หัวข้อได้แก่

1.ค่าจุดคราก(yield point)ของสกรู พบว่ายิ่งค่าจุดครากของสกรูมีค่าสูง ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกเมื่อรับแรงสูงๆก็จะมีมากตามไปด้วย ซึ่งSherwoodและSullivan(1991)ได้กล่าวถึงผลการทดลองของEdgren(1992)เกี่ยวกับปริมาณของแรงที่ใช้ขันสกรูที่ทำจากโลหะทองพาลาเดียม(gold-palladium)โดยใช้แรงขันสกรู 32นิวตัน/ซ.ม. จะทำให้เกิดภาระกระทำก่อนในตัวสกรูสูงสุด และไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกแม้จะมีแรงที่จำลองการบดเคี้ยวมากระทำมากกว่า 1ล้านครั้งก็ตาม ส่วนAndersonและคณะ(1992)กล่าวถึงปริมาณแรงที่ใช้ขันสกรูที่ทำจากโลหะทองผสมในรากเทียมระบบCeraOneมีค่า 32นิวตัน/ซ.ม. ซึ่งทำให้เกิดการหลวมของสกรูน้อยกว่าการใช้สกรูที่ทำจากโลหะไททาเนียม ผู้ทดลองให้เหตุผลว่าจุดครากของโลหะทองผสมมีค่าสูงกว่าโลหะไททาเนี่ยม จึงเป็นไปได้ว่าโลหะทองผสมจะทนต่อแรงขันแน่นและก่อให้เกิดภาระกระทำก่อนที่สูงกว่า

2.ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของโลหะ ขณะที่ขันสกรูเข้ากับตัวรากเทียมจะเกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส แรงที่ใช้ขันสกรูส่วนหนึ่งถูกใช้เพื่อเอาชนะแรงเสียดทาน พบว่าในช่วงต้นๆของการขันสกรู แรงส่วนใหญ่ประมาณ 90%ถูกใช้เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานและมีเพียง 10%เท่านั้นที่ก่อให้เกิดภาระกระทำก่อนในตัวสกรู(Motosh, 1979) ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากความสัมพันธ์ของสมการ $T = KDF$ (Carr,1996) เมื่อT คือค่าแรงบิด, D คือค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนเกลียว และK เป็นค่าคงที่ซึ่งมีผลมาจาก รูปทรงทางเรขาคณิต และความเสียดทาน นั่นก็คือถ้าแรงเสียดทานสูงขึ้น ภาระกระทำก่อนจะลดลง เมื่อค่าแรงบิดคงที่($F = T/KD$)

นอกจากปัจจัยเหล่านี้ สิ่งที่เป็นตัวกำหนดปริมาณของแรงที่ใช้ขันสกรูอีกประการหนึ่งก็คือความต้านทานต่อการหมุนระหว่างรอยต่อของกระดูกกับตัวรากเทียม(torsional resistance) ซึ่งขึ้นกับองค์ประกอบหลายๆอย่าง เช่นความหนาของกระดูกทึบ(cortical bone) พบว่ายิ่งกระดูกชนิดนี้มีความหนามากเท่าใด แรงบิดย้อนกลับ(reverse torque)ที่ทำให้รากเทียมหลุดจากกระดูกก็มากขึ้นเท่านั้น(Niimiและคณะ,1997) และยังขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์รากเทียม Carr(1995) พบว่ารากเทียมที่เคลือบด้วยไฮดรอกซิลล์แอปปาไทต์ที่ฝังในกระดูกขากรรไกรของลิงบาบูนจะต้องใช้แรงบิดย้อนกลับถึง 186นิวตัน/ซ.ม.ซึ่งมากกว่ารากเทียมที่ประดิษฐ์ด้วยโลหะผสมไททาเนียมที่ต้องใช้แรง 78.6นิวตัน/ซ.ม. และโลหะไททาเนี่ยมบริสุทธิ์ที่ต้องใช้แรง 74.0 นิวตัน/ซ.ม.อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนSullivanและคณะ(1996) ได้หาค่าแรงบิดย้อนกลับของ

รากเทียมที่ประดิษฐ์จากโลหะไททาเนี่ยมบริสุทธิ์ซึ่งฝังในกระดูกขากรรไกรที่ปกติไม่มีพยาธิสภาพใดๆของอาสาสมัคร พบว่าแรงบิดย้อนกลับที่ใช้ในขากรรไกรล่างมีค่า 58นิวตัน/ซ.ม. ส่วนในขากรรไกรบนมีค่า 48นิวตัน/ซ.ม. ในขณะที่ใช้แรงบิดย้อนกลับเพียง10นิวตัน/ซ.ม.เพื่อทำให้รากเทียมที่ไม่เกิดosseointegrationหลุดจากกระดูก จากค่าแรงบิดย้อนกลับที่ได้จากการทดลองเหล่านี้สามารถที่จะอนุมานได้ว่าปริมาณแรงขันสกรูตัวหลัก 35นิวตัน/ซ.ม. ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ใช้ในขณะนี้จะไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อการยึดติดระหว่างตัวรากเทียมกับกระดูก (Carr,A.B.,1995)

ด้วยปัจจัยดังกล่าว การใช้แรงขันสกรูที่ถูกต้อง นอกจากจะทำให้เกิดความเสถียรของการยึดติดแล้ว ยังไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อการยึดติดระหว่างตัวรากเทียมกับกระดูก หรือทำให้เกิดความเสียหายแก่ส่วนต่างๆของรากเทียม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะควบคุมปริมาณแรงขันสกรูเพื่อให้ได้ภาระกระทำก่อนตามต้องการ จากการทดลองของ Goheenและคณะ(1994)ที่ได้ทดสอบความสามารถของทันตแพทย์ในการขันสกรูเพื่อให้ได้แรงตามที่ต้องการโดยใช้เครื่องขันสกรูด้วยมือ(hand held screw driver) และให้ทำซ้ำ 6ครั้ง ผลปรากฏว่าไม่มีความแม่นยำของแรงที่ได้ กล่าวคือค่าของแรงที่ได้อยู่ในช่วง0.71-13.1,14-33.7,8.26-36.2นิวตัน/ซ.ม.เมื่อแรงที่กำหนดคือ10,20,30นิวตัน/ซ.ม.ตามลำดับ และถ้าให้ทันตแพทย์เฉพาะทางศัลยศาสตร์ช่องปากที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับการรับรู้ระดับของแรงบิดเป็นอย่างดีทำการขันสกรู ก็ยังพบว่าแรงที่ได้มีค่าน้อยกว่าที่กำหนดไว้ถึง 23-48%เมื่อแรงที่กำหนดคือ 10-20นิวตัน/ซ.ม. และจากการทดลองเร็วๆนี้ รายงานว่าการใช้เครื่องขันสกรูด้วยมือให้ผลที่ไม่แน่นอน ก่อให้เกิดการยึดติดที่ไม่เหมาะสม(Jaardaและคณะ1994;Goheenและคณะ1994) ซึ่งมักจะได้ภาระกระทำก่อนน้อยกว่าค่าสูงสุดที่กำหนดไว้(DellingsและTebrock,1993;Goheenและคณะ,1994) อาจก่อให้เกิดการหลวมของสกรูได้(Jorneusและคณะ,1992)

ในกรณีที่ใช้เครื่องควบคุมแรงบิดด้วยไฟฟ้าก็ยังพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของแรงที่ได้ โดยมีปัจจัยเรื่องความเร็วในการขันสกรูที่มีผลต่อปริมาณแรงที่ได้ ในกรณีที่ใช้ความเร็วต่ำในการขันสกรูมักจะได้แรงน้อยกว่าที่กำหนดไว้เมื่อระดับของแรงที่กำหนดคือ 10,32นิวตัน/ซ.ม. จากการทดลองที่CambridgeและSheffieldซึ่งใช้เครื่องควบคุมแรงบิดด้วยไฟฟ้าของบริษัท Branemarkพบว่าแรงที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง65-80%ของค่าที่กำหนดไว้เมื่อใช้ความเร็วต่ำในการขันสกรู และจะได้ปริมาณแรงสูงกว่าค่าที่กำหนดคือ 20นิวตัน/ซ.ม.เมื่อใช้ความเร็วสูงในการขันสกรู อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองส่วนหนึ่งของ DellingsและTebrock(1993) เกี่ยวกับความแม่นยำของประแจควบคุมแรงบิด(torque wrench)ตัวใหม่ที่ถูกผลิตขึ้น เช่น Dyna torque

wrench พบว่าให้แรงเฉลี่ยใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้อย่างมีนัยสำคัญ(10.32,20.37,29.40นิวตัน เมื่อแรงที่กำหนดคือ10,20,30นิวตันตามลำดับ) ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องมือขันสกรูที่ถูกต้องจึงมีความสำคัญในการที่จะได้ภาระกระทำก่อนตามต้องการ แต่ในการทดลองของBinon(1992) เกี่ยวกับการวัดช่องว่างระหว่างรอยต่อของส่วนประกอบต่างๆของรากเทียม ผู้ทดลองไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดของปริมาณแรงที่ใช้ขันสกรู จึงอาจทำให้ความน่าเชื่อถือของการทดลองลดลง

ปัจจัยประการที่สาม คือ ความเที่ยงตรงและความแม่นยำของวิธีการวัดตลอดจนถึงความละเอียดของเครื่องมือที่ใช้วัด ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าช่องว่างระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมมีค่าความแปรปรวนค่อนข้างสูง ความจริงแล้วสาเหตุอาจจะไม่ได้เกิดมาจากกลไกที่กล่าวมาข้างต้นแต่เพียงอย่างเดียว แต่อาจจะเป็นผลมาจากความไวและความละเอียดของวิธีการทดลอง Jemt และคณะ(1996)ได้รายงานผลการศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบวิธีการวัดความแนบสนิทระหว่างฟันปลอมกับตัวหลัก 4วิธี ซึ่งประกอบด้วยเทคนิคการใช้แท่งสไตลัส(stylus contact technique) 2วิธี การใช้เลเซอร์ในการอ่านค่า 1วิธี และใช้เทคนิคโฟโตเมตตริก 1วิธี โดยได้ทำการทดลองในสหรัฐอเมริกาและสวีเดนเป็นเวลา 2ปี พบว่าเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ทั้ง 4วิธี ไม่มีวิธีการใดที่มีความน่าเชื่อถือหรือให้ค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าวิธีการอื่นๆ เพียงแต่แสดงให้เห็นว่าวิธีการวัดทุกๆวิธีให้ค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงความเป็นจริง และข้อมูลส่วนใหญ่ที่นำมาเปรียบเทียบกันในระบบ3มิติ มีความแตกต่างกันไม่เกิน40ไมโครเมตร แสดงว่าวิธีการวัดแต่ละวิธีก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในตัวของมันเอง อย่างไรก็ตามแม้ว่าการวัดจะมีคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเทียบกับช่องว่างที่ทำการวัดซึ่งมีขนาดเล็กมากๆก็อาจทำให้ค่าที่วัดได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงต้องให้ความสำคัญต่อปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อการวัดซึ่งได้แก่ ตำแหน่งที่ทำการวัด การทำเครื่องหมายเพื่อเป็นตรรชนีในการวัดซ้ำในแต่ละครั้งและกำลังขยายที่ใช้วัด

จากการทดลองของIsaและHobkirk(1995)พบว่าภายหลังจากการขันสกรูยึดตัวหลักต่อยอดเข้ากับตัวหลัก จะเกิดแรงเครียดบนตัวหลักทั้ง2ข้างไม่เท่ากัน แสดงว่าความแนบสนิทระหว่างตัวหลักต่อยอดกับตัวหลักทั้ง 2ข้างไม่เท่ากัน ถ้านำผลการทดลองมาคาดคะเนช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างตัวหลักกับตัวรากเทียมโดยรอบแล้วย่อมไม่เท่ากันทุกๆจุด ดังนั้นค่าของช่องว่างที่ได้จึงควรเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดโดยรอบตัวรากเทียมไม่ควรจะเป็นค่าที่ได้จากจุดใดจุดหนึ่ง ซึ่งในการทดลองที่ผ่านๆมาไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดในส่วนนี้เลย(Binon,1992,1995, 1996;Suttlerและคณะ1993)

ในส่วนที่เกี่ยวกับกำลังขยายที่เลือกใช้นั้น สิ่งที่เป็นตัวกำหนดก็คือ ขนาดของช่องว่างที่จะวัดและขนาดของเครื่องหมายที่ใช้เป็นดรรชนี ซึ่งทั้ง 3 สิ่งนี้ต้องสัมพันธ์กัน ยิ่งช่องว่างที่จะวัดมีขนาดเล็กเท่าใด กำลังขยายที่ใช้ต้องมากขึ้นเท่านั้น และขนาดของเครื่องหมายที่เป็นดรรชนีต้องมีขนาดเล็กด้วยเช่นกัน ไม่เช่นนั้นเครื่องหมายที่ทำขึ้นจะถูกขยายจนหลุดออกจากจอภาพของเครื่องวัด แต่ในการทดลองของBinon(1992,1995,1996)ไม่ได้กล่าวถึงรายละเอียดของการทำเครื่องหมายบนตัวรากเทียมซึ่งมีความสำคัญมากต่อความน่าเชื่อถือของการทดลอง และผู้ทดลองได้เลือกใช้กำลังขยายเพียง 200เท่าในการวัดซึ่งรายละเอียดและความแม่นยำของการวัดไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากช่องว่างที่วัดมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับมาตราส่วนที่ใช้อ้างอิงในกล้อง ดังนั้นในการทดลองเพื่อวัดช่องว่าง ต้องสามารถควบคุมปัจจัยเหล่านี้จึงจะได้ผลการทดลองที่น่าเชื่อถือ

ปัจจัยประการที่สี่ คือ ความเรียบของพื้นผิวที่จะนำมายึดกัน เนื่องจากโดยพื้นฐานแล้วพื้นผิวโลหะทั้งหมดที่มาสัมผัสกันไม่ได้เรียบอย่างสมบูรณ์ แม้จะใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดอ่อนในการผลิต(Jorneusและคณะ,1992) หรือใช้การขัดเรียบด้วยวิธีการต่างๆก็ตาม(Sorensen, 1991) เมื่อตรวจบริเวณพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงๆจะพบว่ามีส่วนขรุขระเล็กๆ (microroughness)กระจายอยู่ทั่วพื้นผิว ทำให้พื้นผิวไม่แนบสนิทกันทุกๆจุด เมื่อรอยต่อของสกรูกับตัวหลักและตัวรากเทียมได้รับแรงจากภายนอก จะเกิดการเคลื่อนขยับจำนวนน้อยๆ(micro-movement)ระหว่างพื้นผิวที่สัมผัสกัน ก่อให้เกิดการสึกในบริเวณใต้หัวสกรู เกลียวของสกรู เกลียวของรากเทียม และรอยต่อของตัวหลักกับตัวรากเทียม ทำให้เกิดการดึงผิวสัมผัสที่อยู่ห่างกันให้เข้ามาชิดกันมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นกับความขรุขระเริ่มต้นและความแข็งผิวของโลหะ ขนาดของแรงบิดที่ใช้(Jorneusและคณะ,1992)และระยะเวลาที่มีการเสียดสี(Binon,1994) จากปรากฏการณ์นี้มีผลทำให้เกิดการแนบกันในบริเวณที่กล่าวมาเพิ่มขึ้น แต่ภาระกระทำก่อนในตัวสกรูก็จะลดลงด้วยเรียกว่า "embedment relaxation" ดังนั้นภายหลังจากการขันสกรูของตัวหลักครั้งแรกในเวลาไม่กี่นาที ภาระกระทำก่อนอาจจะลดลงถึง2-10%(Breedingและคณะ, 1993) และถ้าผลรวมของ settling effect มากกว่าการยืดตัวเนื่องจากความยืดหยุ่นของสกรูแล้วจะเกิดความล้มเหลวในการยึดติด เนื่องจากไม่มีแรงจากการสัมผัส(contact force)หลงเหลือเพียงพอที่จะยึดสกรูเอาไว้ได้(Jorneusและคณะ,1992) ดังนั้นในการทดลองที่ต้องมีการขันสกรูตัวหลักและคลายสกรูออกหลายๆครั้ง เช่นในการทดลองของ Breedingและคณะ(1993) ผู้ทดลองได้ควบคุมปัจจัยเกี่ยวกับembedment relaxationโดยการทิ้งช่วงเวลาในการขันสกรูซ้ำห่าง

กันครั้งละ 10นาที แต่ในการทดลองของ Binonและคณะ(1992)ที่ทำการขันสกรูซ้ำถึง 30ครั้ง กลับไม่ได้กล่าวถึงการควบคุมปัจจัยตัวนี้เลย

จากปรากฏการณ์ settling effect และembedment relaxation ทำให้เห็นความสำคัญของความเรียบของพื้นผิว ซึ่งมีผลต่อภาระกระทำก่อนของสกรู Carrและคณะ(1996)พบว่าการขัดเรียบและการขัดมันตัวหลักต่อยอดที่ได้จากการหล่อโลหะจากกระสวนหล่อขี้ผึ้ง(wax pattern) และชนิดของโลหะที่ใช้มีผลต่อภาระกระทำก่อน โดยโลหะชนิดที่มีจุดหลอมตัวสูง(high fusing)จะมีภาระกระทำก่อนน้อยกว่าโลหะชนิดที่มีจุดหลอมตัวต่ำ(low fusing) และความแข็งของโลหะจะลดลง 11-43 % ภายหลังจากกระบวนการหล่อโลหะไม่ว่าโลหะที่ใช้จะเป็นชนิดใดก็ตาม นอกจากนี้ยังพบอีกว่าภาระกระทำก่อนจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้ตัวหลักต่อยอดสำเร็จรูปที่ผลิตจากบริษัท ซึ่งผลการทดลองมีทิศทางเดียวกับการทดลองของCarrและคณะ(1993)ที่พบว่าภายหลังจากการขัดเรียบผิวสัมผัสของส่วนประกอบของรากเทียมที่ได้จากการหล่อโลหะ ภาระกระทำก่อนของสกรูที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นคือมีค่า 322นิวตัน/ซ.ม. เมื่อเทียบกับไม่ได้ขัดเรียบซึ่งมีค่า 97นิวตัน/ซ.ม. แสดงว่าเมื่อทำการขันสกรูในครั้งแรกๆพลังงานส่วนหนึ่งจะถูกใช้เพื่อทำให้ผิวที่ขรุขระเรียบขึ้นแทนที่จะถูกนำไปใช้เพื่อทำให้สกรูยึดตัวออก จึงทำให้ค่าภาระกระทำก่อนมีค่าน้อย แต่เมื่อทำการขันและคลายสกรูออกซ้ำหลายๆครั้งผิวสัมผัสจะเรียบขึ้น ในทางทฤษฎีแล้วค่าภาระกระทำก่อนที่ได้จากการขันสกรูครั้งต่อๆไปควรจะสูงขึ้นเนื่องจากมีการยึดตัวของสกรูเพิ่มขึ้น แต่ในการทดลองของHaacและคณะ(1995)กลับไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างการยึดตัวของสกรูกับจำนวนครั้งของการขันสกรูซ้ำ ดังนั้นจึงไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวว่าเมื่อผิวสัมผัสเรียบขึ้นจะมีการถ่ายทอดแรงขันแน่นเพื่อทำให้สกรูเกิดการยึดตัว และยังพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ผู้อื่นได้ทดลองไว้ Haacได้ให้เหตุผลว่าการทำให้ผิวโลหะที่มีส่วนขรุขระเล็กๆ เรียบขึ้น อาจไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานจากการขันสกรูมากเท่ากับที่คาดเอาไว้ เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้รากเทียมตัวเดียวตลอดการทดลอง ทำให้เกลียวของรากเทียมเรียบอย่างรวดเร็วในช่วงต้นๆของการทดลอง ดังนั้นความต้องการที่จะใช้พลังงานเพื่อทำให้เกลียวสกรูของตัวหลัก กับ เกลียวของตัวรากเทียมเรียบขึ้น จึงน้อยลง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จึงมีค่าต่ำ ในขณะที่ภาระกระทำก่อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการขันสกรูในตัวรากเทียมตัวใหม่ๆ

ปัจจัยประการที่ห้า คือ อายุความล้าของสกรู เนื่องจากลักษณะแรงที่มากระทำต่อฟันปลอมเป็นแบบวงจรที่ซ้ำๆ(cyclic loading) ดังนั้นเมื่อต้องการทราบว่าจำนวนครั้งของแรงที่มากระทำจนทำให้เกิดความล้มเหลวของสกรูเป็นเท่าใดแล้ว ต้องศึกษากราฟความสัมพันธ์ของ

ปริมาณแรงที่มากระทำ กับ จำนวนครั้งของแรงที่มากระทำ(S-N curve) พบว่าเมื่อใดก็ตามที่แรงนี้มีค่าน้อยกว่าปริมาณแรงสูงสุดที่สามารถกระทำซ้ำๆโดยไม่ก่อให้เกิดการแตกหักของสกรู ที่เรียกว่าขีดจำกัดเอนดูรานซ์(endurance limit)(RobertและReza,1994) สกรูก็จะสามารถใช้ต่อไปได้เรื่อยๆ แต่ในกรณีที่ไม่มีความแนบสนิทระหว่างฟันปลอมกับตัวรากเทียม ร่วมกับภาระกระทำก่อนในตัวสกรูไม่มากพอที่จะดึงฟันปลอมให้มาแนบกับตัวรากเทียมแล้ว สกรูจะเป็นตัวที่ต้องรับแรงที่มากระทำต่อฟันปลอมทั้งหมด หรือถ้ามีความแนบสนิทเพียงบางส่วนและภาระกระทำก่อนสามารถดึงส่วนที่ไม่แนบให้มาสัมผัสกันได้ จะทำให้โครงสร้างบางส่วนเกิดการบิดงอและมีการเสียรูปของผิวสัมผัส ซึ่งทั้ง 2เหตุการณ์นี้จะทำให้ระบบคล้ายกับได้รับแรงที่อยู่นอกแนวแกนของสกรู(Pattersonและคณะ,1992) ทำให้อายุความล้าของสกรูลดลง ดังนั้นกลไกใดก็ตามที่ทำให้ภาระกระทำก่อนในตัวสกรูลดลงแล้ว ก็จะทำให้อายุความล้าของสกรูลดลงด้วยเช่นกัน

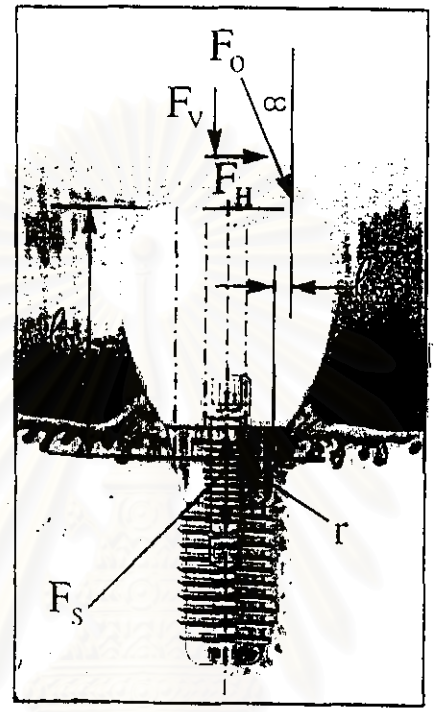
กลไกการกระจายแรงในฟันปลอมที่รองรับด้วยตัวรากเทียม

ดังได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าฟันธรรมชาติมีการเคลื่อนขยับที่แตกต่างจากตัวรากเทียม เนื่องจากในฟันธรรมชาติมีเอ็นยึดปริทันต์ทำให้มีความยืดหยุ่น จึงเกิดการกระจายแรงตลอดความยาวของรากฟันโดยมีจุดศูนย์กลางของการหมุนอยู่ที่บริเวณ1/3ของปลายราก(Weinberg,1993) ยิ่งรากฟันยาวเพิ่มขึ้นเท่าใดการกระจายแรงสู่กระดูกเบ้ารากฟันก็ดีขึ้นเท่านั้น ในขณะที่ตัวรากเทียมมีการเคลื่อนขยับได้น้อยมาก ดังนั้นฟันปลอมที่รองรับด้วยตัวรากเทียมแบบเกลียวจึงเกิดการสะสมแรงจากการบดเคี้ยวเกือบทั้งหมดอยู่ที่บริเวณเกลียวที่3ของรากเทียม(Clellandและคณะ, 1991) ทำให้มีการกระจายแรงส่วนใหญ่ไปสู่บริเวณสันกระดูก ส่วนรากเทียมชนิดทรงกระบอกกลับมีการสะสมแรงในบริเวณส่วนปลาย อย่างไรก็ตามเมื่อมีแรงในแนวระนาบมากระทำต่อรากเทียมทั้ง2แบบ พบว่าการกระจายแรงจากรากเทียมมักจะไปสู่บริเวณสันกระดูก(Rieger,MayberryและBrose,1990) ข้อแตกต่างระหว่างฟันธรรมชาติกับรากเทียมอีกประการหนึ่งก็คือ การยึดติดของฟันปลอมแบบติดแน่นกับฟันธรรมชาติมักใช้ซีเมนต์ ทำให้ทั้งฟันปลอมและฟันธรรมชาติเสมือนเป็นหน่วยเดียวกัน แต่ในฟันปลอมแบบติดแน่นที่รองรับด้วยตัวรากเทียมมักใช้สกรูเป็นตัวช่วยในการยึดติด ซึ่งตัวสกรูมีขนาดเล็กและมีคุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถในการคืนตัวของโลหะ ตัวสกรูจึงเกิดการเปลี่ยนรูปในขณะที่มีการบดเคี้ยว ทำให้บริเวณรอยต่อของส่วนต่างๆของฟันปลอมกับตัวรากเทียมเกิดการเคลื่อนขยับได้เล็กน้อย(Weinberg,1993) ด้วยเหตุนี้รูปแบบการกระจายแรงจากฟันธรรมชาติไปสู่กระดูกจึงแตกต่างจากการกระจายแรงจากรากเทียมไปสู่กระดูกโดยสิ้นเชิง

ในกรณีที่มีการยึดฟันธรรมชาติเข้าด้วยกันโดยการใส่สะพานฟัน เมื่อมีการบดเคี้ยว แรงเหล่านี้จะมีการกระจายไปสู่ส่วนอื่นๆของฟันปลอมโดยทั่วถึง และมีการกระจายแรงไปสู่รากฟันที่ถูกยึดทุกๆซี่ แล้วจึงถ่ายทอดสู่กระดูกที่รองรับอีกทอดหนึ่งอันเนื่องมาจากความหยุ่นตัวของเอ็นยึดปริทันต์ ในขณะที่ฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียมหลายๆซี่กลับมีการกระจายแรงไปสู่ส่วนต่างๆของฟันปลอมที่ต่างกัน กล่าวคือ เมื่อมีแรงจากการบดเคี้ยวกระทำต่อบริเวณใดบริเวณหนึ่งของฟันปลอม แรงบดเคี้ยวจะกระจายไปสู่ตัวรากเทียมและสันกระดูกในบริเวณนั้นๆเป็นส่วนใหญ่ มีการกระจายไปสู่ส่วนอื่นๆของฟันปลอมและตัวรากเทียมตัวอื่นๆน้อยมาก เนื่องจากฟันปลอมมีความแข็งเกร็งและตัวรากเทียมกับกระดูกมีการเคลื่อนไหวได้น้อยมาก อย่างไรก็ตามการกระจายแรงไปสู่รากเทียมตัวอื่นๆก็อาจเกิดขึ้นได้บ้าง เพราะว่าสกรูที่ยึดฟันปลอมสามารถมีการเปลี่ยนรูปอยู่ในช่วง 0.1-0.5ม.ม. (Rangert, Gunne และSullivan,1991) ซึ่งจะกระจายแรงได้มากน้อยเพียงใดขึ้นกับ ความสามารถในการคืนตัวของสกรูที่ใช้ยึดฟันปลอม ระดับของการเปลี่ยนรูปของสกรู ตัวหลัก ตัวรากเทียม และกระดูกที่รองรับ รวมทั้งความแนบสนิทระหว่างตัวฟันปลอมกับตัวรากเทียม จึงพบเสมอว่าเมื่อผู้ป่วยใช้ฟันปลอมไประยะหนึ่งสกรูที่ยึดฟันปลอมมักจะเกิดการหลวม เนื่องจากสกรูเกิดการเคลื่อนขยับทีละเล็กทีละน้อย ร่วมกับความไม่แนบสนิทของฟันปลอมกับตัวรากเทียม ทำให้เกิดการกระจายแรงไปสู่รากเทียมตัวข้างเคียง เป็นการเพิ่มภาระงานแก่รากเทียมตัวอื่นๆ ดังนั้นจึงเป็นการสมควรอย่างยิ่งที่จะนัดผู้ป่วยให้กลับมาตรวจเช็คเป็นระยะๆ เพื่อทำการตรวจสอบการหลวมของสกรู ซึ่งจำเป็นต้องทำการขันสกรูซ้ำ และทำการเปลี่ยนสกรูใหม่ในเวลาที่กำหนด เป็นการป้องกันการแตกหักของสกรูอันเนื่องมาจากความล้าของโลหะ จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของโครงสร้างในการยึดติดของส่วนฟันปลอมกับตัวรากเทียม และการยึดติดของตัวรากเทียมกับกระดูกแตกต่างจากฟันธรรมชาติ เป็นผลให้กลไกการกระจายแรงจากการบดเคี้ยวแตกต่างกัน

เมื่อมีแรงบดเคี้ยวมากระทำต่อฟันปลอม จะเกิดภาระงานต่อตัวรากเทียมในหลายๆรูปแบบ แต่สิ่งที่ควรให้ความสนใจคือ 1.แรงตามแนวแกน และ2.โมเมนต์บิด แรงตามแนวแกนจะก่อให้เกิดการกระจายแรงเค้นไปสู่รากเทียมจึงไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อตัวรากเทียม ในขณะที่โมเมนต์บิดมักเกิดจากแรงที่อยู่นอกแนวแกนของรากเทียม(off-axis external force) และก่อให้เกิดแรงเค้นจำนวนมากแก่บริเวณใดบริเวณหนึ่งของกระดูกที่อยู่รอบรากเทียม ร่วมกับ ก่อให้เกิดแรงเค้นดึงจำนวนมากตรงรอยต่อของรากเทียมกับกระดูกด้วย เรียกว่า เกรเดี้ยนของความเค้น(stress gradient)ซึ่งเป็นอันตรายต่อการยึดติดของตัวรากเทียมและตัวสกรู(Rangertและคณะ,1989) เมื่อมีภาระงานกระทำต่อฟันปลอม โมเมนต์ที่เกิดจากแรง(F_v x l_2 + F_H x l_1)จะ

พยายามหมุนรอบจุดหมุนซึ่งอยู่บริเวณขอบของรากเทียม ดังรูปที่ 10 ในขณะที่โมเมนต์ต่อต้านที่เกิดจากสกรู(F_s x r)ต้องเท่ากับโมเมนต์ที่เกิดจากแรงเพื่อทำให้เกิดความสมดุลย์



รูปที่ 10 แสดงแรง และโมเมนต์ของแรงภายนอกที่มากระทำต่อฟันปลอม

ที่มา: Henson,S. Practical clinical guidelines to prevent screw loosening. Int J Dent Symposia,3(1995), p. 23

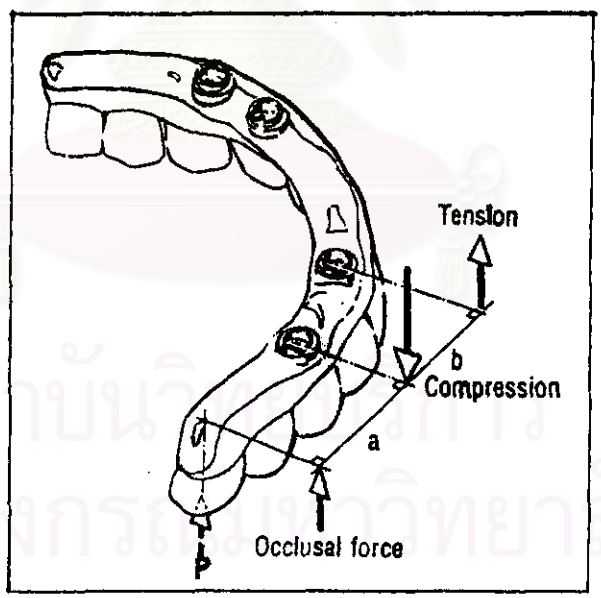
ดังนั้นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดความสมดุลย์ของแรงที่ต่างกันคือ ระยะห่างจากจุดที่แรงมากระทำถึงจุดหมุนซึ่งเรียกว่าแขนของคาน(lever arm) แต่เนื่องจากระยะห่างจากบริเวณที่รับแรงบดเคี้ยวมาสู่จุดหมุน มีค่ามากกว่าระยะห่างจากแนวแรงในตัวสกรูมาสู่จุดหมุน จึงทำให้แรงที่เกิดในตัวสกรูมีค่าสูงเมื่อเทียบกับแรงภายนอกที่มากระทำ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลโดยอ้อมต่อโมเมนต์ของแรงที่กระทำต่อฟันปลอม ได้แก่ ความชันของระนาบเอียงของปุ่มฟัน ระยะในแนวดิ่งระหว่างบริเวณที่รับแรงบดเคี้ยวกับตัวหลักและตัวรากเทียม ระยะในแนวระนาบระหว่างบริเวณที่รับแรงบดเคี้ยวกับแนวแกนของรากเทียม และความเอียงของแนวแกนของรากเทียมกับแนวแรงที่มากระทำ(Weinberg,1998) ปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อขนาดและทิศทางของแรงเฉือนที่เกิดจากแรงบดเคี้ยว ก่อให้เกิดโมเมนต์บิด ซึ่งจะมีผลต่อสกรูที่ยึดฟันปลอม สกรู

ของตัวหลัก ส่วนต้นๆของตัวรากเทียม ในกรณีที่แรงภายนอกมีค่ามากกว่าความแข็งแรงของระบบที่ออกแบบไว้ แรงที่กระทำต่อตัวสกรูจะมีค่ามากกว่าภาระกระทำก่อนของตัวสกรู ก่อให้เกิดการแยกของรอยต่อ การยึดติดจึงขาดความเสถียร เมื่อเกิดเหตุการณ์เช่นนี้ซ้ำๆ สกรูจะหลวมในที่สุด

ในฟันปลอมทั้งปากที่มีรูปทรงลักษณะอักษรตัว U ซึ่งรองรับด้วยรากเทียมหลายๆตัวทางด้านหน้าของขากรรไกรและมีส่วนท้ายยื่นไปทางด้านหลัง(cantilever) มีวิธีการพิจารณาภาระงานที่กระทำต่อระบบโดยอาศัยหลักการของคานงัดชนิดที่ I(class I lever)ดังรูปที่ 11 ซึ่งมีรากเทียม 2คู่เป็นตัวรองรับฟันปลอม โดยรากเทียมแต่ละคู่จะอยู่ชิดส่วนท้ายของฟันปลอมแต่ละด้าน เมื่อมีภาระงานมากระทำที่ส่วนท้ายของฟันปลอม รากเทียมตัวท้ายจะทำตัวเสมือนเป็นจุดหมุนของคานงัด ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์การกระจายแรงได้ดังนี้

1.รากเทียมตัวหน้าจะได้รับแรงดึงเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของแขนของคาน(a/b)

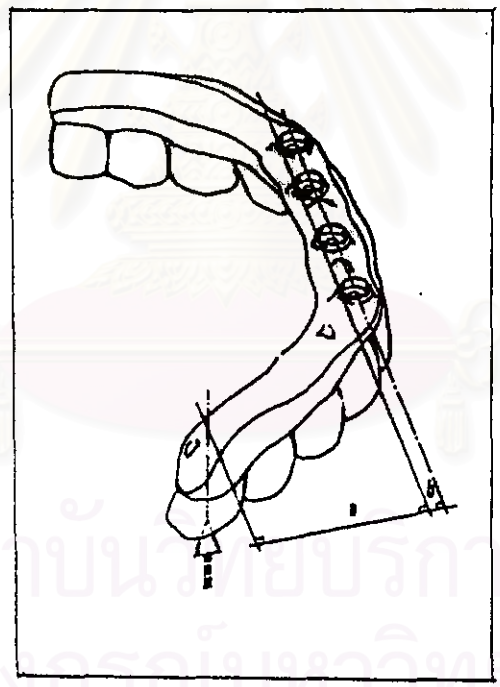
2.รากเทียมตัวท้ายจะได้รับแรงกดซึ่งเป็นผลรวมของแรงที่มากระทำตรงส่วนท้ายของฟันปลอมกับแรงที่ต่อต้านแรงดึงในรากเทียมตัวหน้า



รูปที่11. แสดงลักษณะของคานงัดชนิดที่ I ในฟันปลอมทั้งปากที่รองรับด้วยรากเทียม 2คู่ทางด้านหน้าของขากรรไกร

ที่มา: Rangert,B.;Jemt,T.;and Jorneus,L. Forces and moments on Branemark implants Int J Maxillofac Implants4 (1989), p. 243

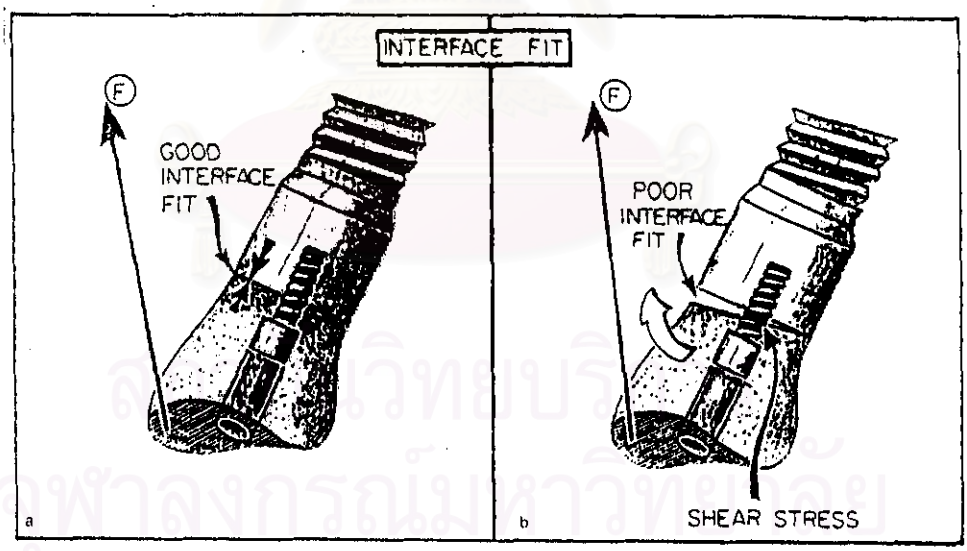
แรงดึงที่เกิดขึ้นเป็นแรงที่พยายามแยกตัวรากเทียมออกจากกระดูก จึงถูกพิจารณาว่าเป็นแรงที่ทำให้เกิดความล้มเหลวได้มากที่สุด ในขณะที่แรงกดจะกดให้ส่วนประกอบต่างๆแนบกันและไม่ก่อให้เกิดปัญหากับตัวรากเทียม แต่สิ่งที่มีความสำคัญก็คืออัตราส่วนของแขนของคานกับระยะระหว่างรากเทียมแต่ละตัว ยิ่งระยะระหว่างรากเทียมมีค่าน้อยลงเท่าใด(b) และระยะทางจากจุดที่แรงกระทำบริเวณส่วนท้ายของฟันปลอมมาถึงตัวรากเทียมตัวท้าย(a)มีค่ามากเท่าใด แรงดึงที่เกิดขึ้นกับตัวรากเทียมที่อยู่ทางด้านหน้าของขากรรไกรจึงมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นถ้ารากเทียมที่อยู่ทางด้านหน้าของขากรรไกรอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน และแรงที่มากระทำบริเวณส่วนท้ายของฟันปลอมอยู่ห่างจากตัวรากเทียมมากๆจะก่อให้เกิดโมเมนต์บิดกับตัวรากเทียมและตัวสกรูดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงแขนของคานในฟันปลอมทั้งปากที่รองรับด้วยรากเทียมที่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน

ที่มา: Rangert,B.;Jemt,T.;and Jorneus,L. Forces and moments on Branemark implants Int J Maxillofac Implants4 (1989), p. 243

ในกรณีเช่นนี้ ความแนบสนิทระหว่างฟันปลอมกับตัวหลักและความแข็งเกร็งของโครงโลหะจะมีผลอย่างมากต่อการกระจายโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้น ถ้าไม่มีความแนบสนิทพอดีระหว่างฟันปลอมกับตัวหลัก จะทำให้ตัวรากเทียมบางตัวต้องรับภาระงานที่มากกว่าปกติ ซึ่งได้แก่ รากเทียมตัวที่มีตัวหลักแนบสนิทกับฟันปลอม ในขณะที่รากเทียมบางตัวรับแรงน้อยกว่าปกติ เมื่อพิจารณารอยต่อของฟันปลอมกับตัวหลักที่ไม่มีความแนบสนิทดังรูป13 จะมีแรงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกถ่ายทอดไปสู่ตัวหลักโดยผ่านบริเวณที่มีการสัมผัสกัน และรอยต่อระหว่างฟันปลอมกับตัวหลักที่ไม่แนบสนิทจะไม่สามารถต้านทานต่อแรงบดเคี้ยว(F)ได้อย่างเต็มที่ ทำให้มีแรงเฉือนที่มากกว่าปกติกระทำต่อตัวสกรูที่ยึดฟันปลอมโดยตรง ซึ่งในภาวะปกติภาระกระทำก่อนที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของตัวหลักกับฟันปลอม จะเป็นตัวที่จำกัดแรงเฉือนที่เกิดกับตัวสกรู เมื่อใดก็ตามที่แรงเฉือนมีค่ามากกว่าภาระกระทำก่อน รอยต่อจะเริ่มเปิด และสกรูเกิดการเสียรูป ถ้าได้รับแรงที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆสกรูจะเกิดการหักในที่สุด ลักษณะเช่นนี้ภาระงานจะถูกส่งต่อไปสู่รากเทียมตัวที่เหลืออยู่ ซึ่งอาจทำให้รากเทียมตัวอื่นๆรับภาระงานที่มากกว่าปกติได้



รูปที่ 13แสดงความแนบสนิทระหว่างตัวหลักกับฟันปลอมมีผลต่อแรงเฉือนที่กระทำต่อตัวสกรูที่ยึดฟันปลอม

ที่มา: Weinberg,L.A. The biomechanics of force distribution in implant-supported prostheses Int J Maxillofac Implants8(1993), p.26.

ในความเป็นจริงแล้ว ภาวะที่ตัวรากเทียมได้รับภาระงานมากกว่าปกติมิได้เกิดจากความไม่แนบสนิทระหว่างฟันปลอมกับตัวหลักแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งเสริมให้เกิดภาวะนี้ อันได้แก่

1.ปัจจัยเกี่ยวกับโครงสร้างทางเรขาคณิตที่มีผลต่อภาระงาน(geometric load factor) ซึ่งประกอบด้วย จำนวนของรากเทียม ตำแหน่งของรากเทียม และลักษณะทางเรขาคณิตของฟันปลอม

2.ปัจจัยเกี่ยวกับภาระงานของการบดเคี้ยว(occlusal load factor)ซึ่งประกอบด้วย แรงบดเคี้ยวในแนวด้านข้าง(lateral occlusal force components) และนิสัยการทำงานนอกหน้าที่ (parafunction habit)

เกี่ยวกับจำนวนและตำแหน่งของตัวรากเทียมที่จะใช้รองรับฟันปลอมเพื่อป้องกันภาวะการรับภาระงานมากกว่าปกตินั้น สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือ การพิเคราะห์สภาวะในช่องปาก และการวางแผนการรักษาที่ถูกต้องตั้งแต่เริ่มการรักษา การที่ทันตแพทย์สามารถประเมินสาเหตุเบื้องต้นของการสูญเสียฟันธรรมชาติ ประวัติเกี่ยวกับนิสัยการทำงานนอกหน้าที่ของผู้ป่วย หรือมีประวัติการแตกหักของฟันธรรมชาติ อาจทำให้ทราบสภาวะการบดเคี้ยวของผู้ป่วย ร่วมกับการตรวจปริมาณและคุณภาพของกระดูกขากรรไกรที่เหลืออยู่ จึงจะทำให้สามารถวางแผนการรักษาเกี่ยวกับจำนวนและตำแหน่งของการใช้รากเทียมได้อย่างถูกต้อง ส่วนลักษณะทางเรขาคณิตของฟันปลอมก็มีผลต่อการกระจายแรงของฟันปลอมค่อนข้างมาก เช่นฟันปลอมแบบติดแน่นทั้งปากที่รองรับด้วยรากเทียมหลายๆตัว เมื่อเทียบกับฟันปลอมติดแน่นบางส่วนที่รองรับด้วยรากเทียมเพียง 2หรือ 3ตัวในด้านใดด้านหนึ่งของขากรรไกร พบว่าฟันปลอมแบบแรกจะมีข้อดีกว่าในแง่ของการมีด้านตรงข้ามของฟันปลอมที่อยู่อีกด้านของขากรรไกร ช่วยต่อต้านแรงบิดจากการบดเคี้ยว(cross arch stabilization) ในขณะที่ฟันปลอมแบบหลังไม่มีลักษณะเช่นนี้ และการที่ตัวรากเทียมในฟันปลอมแบบหลังต้องอยู่ร่วมกับฟันธรรมชาติที่มีการเคลื่อนไหวที่แตกต่างกัน ถ้าร่วมกับการออกแบบจุดสัมผัสของด้านบดเคี้ยวที่ไม่ถูกต้อง จะทำให้ตัวรากเทียมต้องรับแรงบดเคี้ยวที่มากกว่าปกติ เนื่องจากเมื่อมีการกัดสบ ฟันธรรมชาติจะมีการยุบตัวลงได้เล็กน้อยในขณะที่ตัวรากเทียมอยู่กับที่ ดังนั้นแรงจากการบดเคี้ยวเกือบทั้งหมดจึงลงสู่ฟันปลอมและสู่ตัวรากเทียม ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการปรับปรุงด้านบดเคี้ยวของฟันปลอม เพื่อให้มีอิสระในการเคลื่อนฟันธรรมชาติออกนอกศูนย์ เป็นการลดภาระงานที่จะกระทำต่อฟันปลอม(Weinberg, 1998) และการลดความชันของปุ่มฟัน ลดความกว้างของด้านบดเคี้ยวของฟันปลอมให้เล็กลง เป็นการควบคุมแรงในแนวด้านข้างที่จะกระทำต่อฟันปลอม(Rangert, 1997)

การจัดตำแหน่งของตัวรากเทียมในฟันปลอมบางส่วนแบบติดแน่นก็มีผลต่อภาระงานที่กระทำต่อฟันปลอมและตัวรากเทียม เช่น ในกรณีที่รากเทียม3ตัวที่มีการเรียงตัวอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน เมื่อฟันปลอมได้รับแรงบิดในแนวระนาบ ตัวรากเทียมจะเกิดการตอบสนองต่อการบิดหมุนมากกว่าแรงตามแนวแกน ทำให้เกิดแรงเค้นเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากทำการเรียงตัวรากเทียมให้ออกนอกแนวระหว่างรากเทียมแต่ละตัว(offset)ประมาณ 2ถึง 3ม.ม. พบว่ารากเทียมแต่ละตัวจะต้านทานการบิดหมุนซึ่งกันและกัน และสามารถลดโมเมนต์บิดที่กระทำต่อฟันปลอมได้ประมาณ 20ถึง 60% (Daellenbachและคณะ,1996) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งเสริมให้เกิดภาวะที่ตัวรากเทียมรับภาระงานมากกว่าปกติ ได้แก่ ขนาดความยาวด้านใกล้กลางหรือไกลกลางของส่วนฟันปลอมที่ยื่นออกจากตัวรากเทียม(mesial or distal cantilever extension) ขนาดความกว้างที่ขยายออกไปในด้านแก้มหรือด้านลิ้นของฟันปลอมเมื่อเทียบกับตำแหน่งของตัวรากเทียม และความสูงที่มากเกินไปของส่วนครอบฟันและตัวหลักเมื่อเทียบกับตัวรากเทียม ปัจจัยเหล่านี้จะเป็นตัวส่งเสริมให้เกิดแรงเค้นกับตัวรากเทียมเพิ่มขึ้น ดังนั้นการพิจารณาการกระจายแรงในฟันปลอมที่รองรับด้วยรากเทียม จึงต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับภาพรวมของแรงที่มากระทำ ธรรมชาติของการยึดติดของฟันปลอมกับตัวรากเทียม การยึดติดของรากเทียมกับกระดูก และลักษณะการสนองตอบต่อแรงที่มากระทำต่อฟันปลอม รวมทั้งกลไกเชิงกลศาสตร์ จึงจะทำให้การออกแบบฟันปลอมมีประสิทธิภาพ ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อฟันปลอม ตัวรากเทียมและกระดูกที่รองรับตัวรากเทียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย