

การกระจายความเค้นในคลองรากฟันรูปอักษรซีเมื่อมีการบูรณะแบบต่าง ๆ ด้วย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

Stress Distribution in C-shaped Root Canals with Various Restorations : 3D Finite Element Analysis

ณัฐฐา ภูณโณโสภณ¹, จารума ศักดิ์ดี¹, เทียนสิริ เหลืองวิไล² และ ชินาลัย ปิยะชน¹

Nutta Pinyosopon¹, Jaruma Sakdee¹, Thiansiri Luangwilai² and Chinalai Piyachon¹

¹ภาควิชาทันตกรรมอนุรักษ์และทันตกรรมประดิษฐ์ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ

¹Department of Conservative Dentistry and Prosthodontics, Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University, Bangkok

²ภาควิชาคณิตศาสตร์ กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ โรงเรียนนายเรืออากาศ กรุงเทพฯ

²Department of Mathematics, Division of Mathematics and Computer Science, Royal Thai Air Force Academy, Bangkok

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นภายในคลองรากฟันที่มีภาพตัดขวางเป็นรูปอักษรซีเมื่อได้รับการบูรณะแบบต่าง ๆ ด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยนำฟันกรามล่างซี่ที่ 2 ที่ถูกถอนของมนุษย์ศึกษาโครงสร้างภายในด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ จำนวน 10 แบบจำลอง คือ ฟันปกติ ฟันที่บูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิต ฟันที่บูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยคาร์บอนหน้าตัดกลมจำนวน 1 และ 2 อัน ฟันที่บูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้วหน้าตัดกลมจำนวน 1 และ 2 อัน ฟันที่บูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมจำนวน 1 และ 2 อัน ฟันที่บูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรีจำนวน 1 และ 2 อัน วิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แอนซิส โดยให้แรงขนาด 45 นิวตัน บริเวณด้านบดเคี้ยวด้วยหัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร พบว่าการบูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตทำให้เกิดการสะสมของความเค้นเป็นปริมาณสูงที่สุด โดยมากกว่าฟันปกติ เดือยฟันเส้นใยหน้าตัดกลมมีการสะสมความเค้นน้อยกว่าเดือยฟันหน้าตัดวงรี และการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยจำนวน 2 อัน มีการสะสมความเค้นใกล้เคียงกับฟันปกติและน้อยกว่าการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยจำนวน 1 อัน การบูรณะทุกแบบมีรูปแบบการกระจายความเค้นสะสมที่บริเวณคอฟันมากที่สุดโดยเฉพาะด้านใกล้แก้ม ภายใต้สภาวะของการศึกษานี้สรุปได้ว่าการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้วหรือเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมจำนวน 2 อัน มีปริมาณของความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าการบูรณะแบบอื่น ๆ

คำสำคัญ: คลองรากฟันรูปอักษรซี, เดือยฟันเส้นใย, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

The aim of this study was to investigate the stress distribution in C-shaped root canal restored with various restorations by 3D finite element analysis. Extracted permanent mandibular second molar was evaluated by micro-computed tomography. Ten 3-dimensional finite element analysis models were created and

adapted by using the ANSYS computer software: normal tooth, tooth restored with resin composite, tooth restored with 1 and 2 carbon fiber posts, tooth restored with 1 and 2 glass fiber posts, tooth restored with 1 and 2 quartz fiber posts, tooth restored with 1 and 2 oval fiber posts. A 45-N load was applied using a 6-mm diameter of sphere on the occlusal surface. A tooth restored with resin composite core showed the highest amount of stress concentration which was higher than that of the normal tooth. Stress concentration of teeth restored with circular fiber posts was lower than that of those restored with oval fiber posts. The amount of stress in the teeth restored with 2-fiber posts were approximate to normal tooth and lower than that of those restored with 1-fiber post. Various restorations exhibited the high stress concentration at cervical area, especially on the buccal aspect. Under the condition of this study, it was concluded that C-shaped root canal teeth restored with two glass fiber posts or two quartz fiber posts showed low stress concentrations when compared to the other types of restorations.

Keywords: C-shaped root canal, Fiber post, Finite element analysis

Received Date:

Accepted Date:

doi:

ติดต่อเกี่ยวกับบทความ:

ชินาลัย ปิยะชน คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110 ประเทศไทย โทรศัพท์: 02-6495212, 081-5506043

อีเมล: piyach@hotmail.com

Correspondence to:

Chinalai Piyachon Faculty of Dentistry, Srinakharinwirot University, Wattana, Bangkok 10110 Thailand. Tel: 02-6495212, 081-5506043

Email: piyach@hotmail.com

การบูรณะฟันที่เหมาะสมส่งผลต่อการคงอยู่ของฟันจากการศึกษาของ Vire¹ พบว่าฟันที่ถูกถอนภายหลังจากการรักษาคลองรากฟันร้อยละ 59.4 เกิดจากความล้มเหลวในการบูรณะ ทำให้ฟันมีการแตกหัก ฟันที่ได้รับการรักษาคลองรากฟันมักมีการสูญเสียเนื้อฟันค่อนข้างมากจึงจำเป็นต้องมีการใส่เดือยฟันและสร้างแกนฟันเพื่อให้ครอบฟันสามารถยึดติดได้

ปัจจุบันมีเดือยฟันหลายชนิด โดยเดือยฟันเสริมเส้นใย (fiber-reinforced posts) เป็นชนิดที่ได้รับความนิยมได้แก่ เดือยฟันเส้นใยคาร์บอน เดือยฟันเส้นใยแก้วและเดือยฟันเส้นใยควอตซ์ ซึ่งมีข้อดีคือ มีค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ที่ใกล้เคียงกับเนื้อฟันและเมื่อใช้ร่วมกับเรซินซีเมนต์ พบว่าเกิดการกระจายแรงภายในรากฟันได้ดี ช่วยลดการแตกหักของรากฟันได้² นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาเดือยฟันไฟเบอร์ที่มีรูปร่างหน้าตัดวงรี ช่วยลดการกรอเตรียมคลองรากฟันที่มีรูปร่างหน้าตัดวงรี และลดความหนาของชั้นเรซินซีเมนต์³ อีกทั้งได้มีการศึกษาของ Newman และคณะ⁴ พบความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไฟเบอร์ต่อเรซินมีลักษณะแปรผันตรงกับค่าความต้านทานต่อการแตกหักของฟัน ดังนั้นการใช้เดือยฟันที่มีขนาดพอดีกับคลองรากฟันจะลดปริมาณของซีเมนต์และช่วยเพิ่มค่าความต้านทานต่อการแตกหักของฟัน

นอกจากชนิดและรูปร่างของเดือยฟันที่ส่งผลต่อการกระจายแรง มีการศึกษาพบว่าลักษณะรูปร่างภายนอกของรากฟัน ลักษณะรูปร่างภายในคลองรากฟันและความหนาของเนื้อฟัน ส่งผลต่อตำแหน่งและทิศทางการแตกของรากฟันได้⁵ คลองรากฟันที่มีภาพตัดขวางเป็นรูปอักษรซีเป็นระบบคลองรากฟันที่มีความซับซ้อน ซึ่งพบได้ร้อยละ 2.7 - 8 ของฟันกรามล่าง พบมากในประชากรชาวเอเชีย และพบมากที่สุดในพื้นที่ฟันกรามล่างซี่ที่ 2⁶ จากการศึกษาในประชากรไทย⁷ พบว่ามีอุบัติการณ์ของฟันที่มีภาพตัดขวางคลองรากฟันเป็นรูปอักษรซีในฟันกรามล่างซี่ที่ 2 ร้อยละ 10 และในฟันกรามล่างซี่ที่ 3 ร้อยละ 11 นอกจากนี้การศึกษาของ Chai และ Thong⁸ พบว่าผนังของคลองรากฟันที่เป็นรูปอักษรซีบริเวณที่บางที่สุดมีความหนาเฉลี่ย 0.58 ± 0.21 มิลลิเมตร ที่บริเวณด้านลิ้น และ 0.96 ± 0.26 มิลลิเมตร ที่บริเวณด้านแก้ม ดังนั้นการบูรณะด้วยเดือยฟันในฟันที่มีคลองรากฟันเป็นรูปอักษรซี จึงมีความยากทั้งด้านความซับซ้อนของระบบคลองรากฟันและความบางของผนังคลองรากฟัน

จากการศึกษาที่ผ่านมา^{9,10} พบว่าการบูรณะด้วยเดือยฟันเสริมเส้นใยสามารถกระจายความเค้นได้ดีกว่าเดือยฟันโลหะ

เหล็ก และการบูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตมีการกระจายความเค้นที่ใกล้เคียงกับเดือยฟันเสริมเส้นใย นอกจากนี้การศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Piyachon และคณะ¹¹ ถึงรูปแบบการกระจายความเค้นในแบบจำลองคลองรากฟันที่มีภาพตัดขวางรูปอักษรซี เมื่อได้รับการบูรณะด้วยเดือยฟันสำเร็จรูป พบว่าเดือยฟันเส้นใยแก้วมีความเค้นสะสมในเดือยฟันและในเนื้อฟันบริเวณปลายรากฟันเป็นปริมาณน้อยกว่าเดือยฟันโลหะไทเทเนียมและเดือยฟันเส้นใยคาร์บอน แต่ในการศึกษาดังกล่าวทำการศึกษาในแบบจำลองคลองรากฟันที่สร้างภาพขึ้นจากรูปทรงเรขาคณิต โดยไม่มีอวัยวะปริทันต์ล้อมรอบรากฟัน จนถึงปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการบูรณะฟันด้วยเดือยฟันชนิดต่าง ๆ ที่มีรูปร่างแตกต่างกันและมีจำนวนที่ต่างกัน ในฟันที่มีรากฟันเป็นรูปอักษรซีที่สร้างแบบจำลองจากภาพ 3 มิติของเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตร จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ เพื่อศึกษาถึงรูปแบบของการกระจายความเค้นภายในคลองรากฟันที่มีภาพตัดขวางเป็นรูปอักษรซี เมื่อมีการบูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตและการบูรณะด้วยเดือยฟันสำเร็จรูปที่มีชนิดของเส้นใย รูปร่างหน้าตัดและจำนวนของเดือยฟันที่ต่างกัน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

โครงการวิจัยนี้ได้ผ่านการพิจารณาข้อเสนอโครงการวิจัยเกี่ยวกับมนุษยจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมในการทำวิจัย คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒแล้ว

กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างเป็นฟันกรามล่างซี่ที่ 2 ของมนุษย์ที่ถูกถอน นำมาศึกษาโครงสร้างรายละเอียดภายในด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ระดับไมโครเมตรโดยใช้เครื่องสกายสแกน (Sky-Scan 1173, Bruker microCT, Belgium) ซึ่งแสดงข้อมูลเป็นภาพ 3 มิติ จากนั้นทำการคัดเลือกฟันที่มีภาพตัดขวางบริเวณรากฟันส่วนต้นเป็นคลองรากฟันโค้งต่อเนื่องเป็นรูปอักษรซีโดยไม่มีการแยกของคลองรากฟัน และมีลักษณะคลองรากฟันในภาพรังสีเป็นแบบที่ 1 ตามการจัดจำแนกของ Fan และคณะ¹² คือ มีการแยกของคลองรากฟันที่บริเวณกึ่งกลางของรากฟัน ซึ่งจัดเป็นลักษณะที่สามารถพบได้บ่อย

การสร้างแบบจำลอง

นำภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ที่มีสกุลของภาพเป็นเอสทีแอลไปเข้าโปรแกรมโซลิดเวิร์คส์ (SolidWorks2016, Dassault Systèmes, France) เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยฟันจะฝังอยู่ในกระดูกเนื้อแน่นและกระดูกเนื้อโปร่งที่ระดับต่ำกว่าบริเวณรอยต่อระหว่างเคลือบฟันกับเคลือบรากฟันเป็นระยะทาง 2 มิลลิเมตรและมีเอ็นยึดปริทันต์ที่มีความหนา 200 ไมโครเมตร⁹ คลองรากฟันมีขนาดเท่ากับการขยายคลองรากฟันด้วยไฟล์โปรแทเปอร์ยูนิเวอร์แซล (Protaper Universal, Dentsply Maillefer, Switzerland) ขนาด F2 และมีวัสดุอุดคลองรากฟันกัตตาเปอร์ชาอยู่บริเวณปลายราก 4 มิลลิเมตร ประกอบด้วย 10 แบบจำลอง คือ ฟันปกติ ฟันที่บูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิต ฟันที่บูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยคาร์บอน 1 และ 2 อัน ฟันที่บูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้ว 1 และ 2 อัน ฟันที่บูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยควอตซ์ 1 และ 2 อัน และฟันที่บูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยหน้าตัดวงรี 1 และ 2 อัน

เดือยฟันเส้นใยคาร์บอน เดือยฟันเส้นใยแก้ว และเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนปลาย 0.6 มิลลิเมตร รูปทรงกรวยมีความฝายร้อยละ 6 และเดือยฟันเส้นใยหน้าตัดวงรี (ELLIPSON™ POST,RTD/Satelec, Merigcac, France) มีชนิดของเส้นใยเป็นเส้นใยควอตซ์ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนปลาย 0.6 มิลลิเมตร มีความกว้าง

และความหนา 1.8 และ 1.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ ใช้พานาเวีย (PANAVIA™, Kuraray, Japan) เป็นเรซินซีเมนต์ในการยึดติดเดือยฟัน โดยมีการยึดติดอย่างสมบูรณ์ระหว่างเรซินซีเมนต์กับเดือยฟัน และเนื้อฟัน บูรณะในส่วนตัวฟันด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตและครอบฟันโลหะทอง (Gold crown) กำหนดให้เรซินซีเมนต์ (Variolink®II+Heliobond, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) ระหว่างครอบฟันและแกนฟันมีความหนา 200 ไมโครเมตร³ จากนั้นนำแบบจำลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แอนาลิส (ANSYS ver 17; ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) กำหนดค่าของวัสดุที่มีสมบัติเป็นไอโซโทรปิก (ตารางที่ 1) และออร์โทโทรปิก (ตารางที่ 2) ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการทดสอบคอนเวอร์เจนซ์ โดยกำหนดให้มีค่าไม่เกินร้อยละ 6¹³ เอลิเมนต์ที่ใช้มีรูปร่างเป็นปิรามิดฐานสามเหลี่ยม (tetrahedral) แต่ละแบบจำลองมีจำนวนของเอลิเมนต์ที่แตกต่างกันไป โดยมีจำนวนของเอลิเมนต์มากที่สุด 956,111 เอลิเมนต์และมีจุดต่อมากที่สุด 1,400,913 จุด และใช้แอดวานซ์ฟังก์ชันเคอฟเวเจอร์ (advanced function curvature) มุม 30 องศา ทำการศึกษาโดยการให้แรงขนาด 45 นิวตัน¹⁴ บริเวณด้านบดเคี้ยวด้วยหัวกดทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ในทิศทางทำมุม 45 องศากับพื้นเอียง (inclined plane) ของปุ่มฟันใกล้กลางใกล้แก้ม พื้นเอียงของปุ่มฟันใกล้กลางใกล้แก้มและพื้นเอียงของปุ่มฟันใกล้กลางใกล้

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติของยัง และค่าอัตราส่วนของปัวซองของวัสดุที่มีสมบัติเป็นไอโซโทรปิก

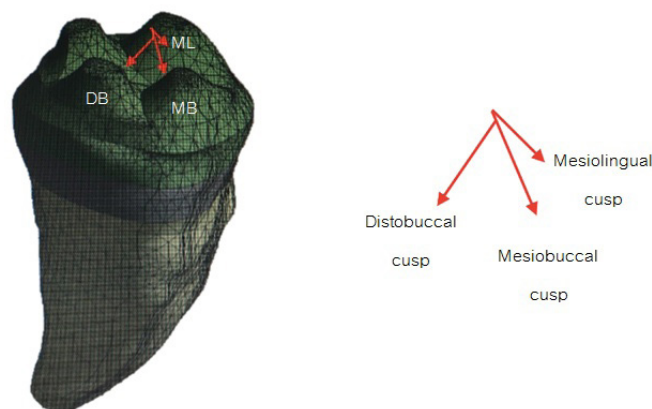
Table 1 Mechanical properties of isotropic materials.

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	References
Dentine	18.6	0.31	(10,16)
Compact bone	13.7	0.3	(3,10)
Cancellous bone	1.37	0.3	(3,10)
Periodontal ligament	0.0689	0.45	(10)
Gold crown	70	0.3	(17)
Variolink II + Heliobond	7.6	0.3	(16)
Panavia	18.6	0.28	(17)
Guttapercha	0.00069	0.45	(3,16)
Resin composite	16.6	0.24	(10)

ตารางที่ 2 ค่ามอดูลัสของยัง (E) ค่าอัตราส่วนของปัวซอง (V) และค่ามอดูลัสของแรงเฉือน (G) ของวัสดุที่มีสมบัติเป็นออร์โธทรอปิก^{17,18}

Table 2 Mechanical properties of orthotropic materials.

Mechanical properties	Carbon fiber post	Glass fiber post	Quartz fiber post
Ex (GPa)	118	37	48.2
Ey (GPa)	7.20	9.5	8.2
Ez (GPa)	7.20	9.5	8.2
Vxy	0.27	0.27	0.32
Vxz	0.34	0.34	0.4
Vyz	0.27	0.27	0.32
Gxy (GPa)	2.80	3.10	3.0
Gxz (GPa)	2.70	3.50	1.3
Gyz (GPa)	2.80	3.10	3.0



รูปที่ 1 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงตำแหน่งทิศทางของแรงที่กดลงบนบริเวณด้านบดเคี้ยว (DB คือ ปุ่มฟันไกลกลางใกล้แก้ม MB คือ ปุ่มฟันใกล้กลางใกล้แก้ม และ ML คือ ปุ่มฟันใกล้กลางใกล้ลิ้น)

Figure 1 Finite element analysis model and loading conditions (DB: Distobuccal cusp, MB: Mesiobuccal cusp and ML: Mesiolingual cusp).

ผล

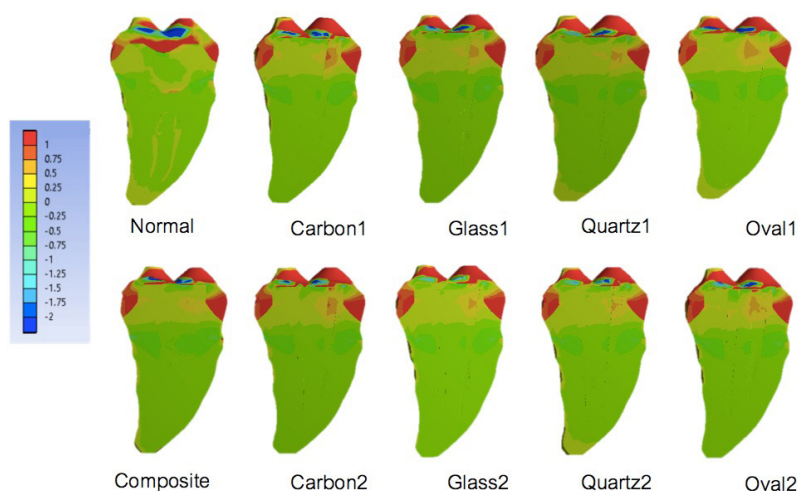
เมื่อพิจารณาความเค้นหลักสูงสุด (Maximum principal stress) พบว่าฟันปกติและการบูรณะแบบต่าง ๆ เกิดการสะสมของความเค้นหลักสูงสุดเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดยมีความเค้นดิ่งสูงสุดอยู่ในช่วง 10.78 – 14.72 เมกกะปาสกาล และความเค้นอัดสูงสุดอยู่ในช่วง 8.56 – 12.79 เมกกะปาสกาล

จากภาพตัดตามแนวยาวในแนวใกล้กลางไกลกลาง แสดงรูปแบบการกระจายของความเค้นหลักสูงสุดของฟัน

ปกติและฟันที่ได้รับการบูรณะแบบต่าง ๆ (รูปที่ 2) พบว่าการบูรณะแบบต่าง ๆ มีรูปแบบการกระจายความเค้นที่คล้ายคลึงกัน โดยมีการสะสมความเค้นอัดเป็นปริมาณมากบริเวณคอฟัน และเกิดความเค้นดิ่งขึ้นภายในเดือยฟัน การบูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตเกิดการสะสมของความเค้นอัดในรากฟันบริเวณใกล้คอฟันมากกว่าการบูรณะด้วยเดือยฟัน เส้นใยชนิดต่าง ๆ ส่วนรูปแบบการกระจายและปริมาณการสะสมของความเค้นหลักสูงสุดในเดือยฟันพบว่าเดือยฟันเส้นใยคาร์บอนมีความเค้นดิ่งที่เกิดขึ้นภายในเดือยฟันมากที่สุด

เดือยฟันเส้นใยแก้วและเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมมีความเค้นดิ่งที่เกิดขึ้นภายในเดือยฟันน้อยที่สุดและใกล้เคียงกัน

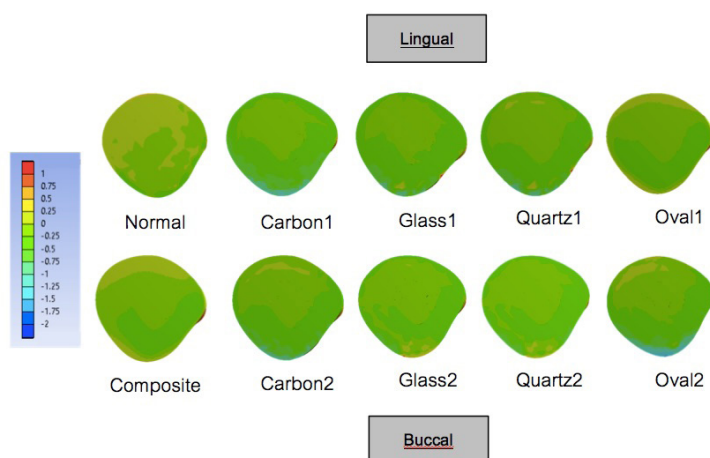
นอกจากนี้พบว่าความเค้นดิ่งที่สะสมอยู่ภายในเดือยฟันลดลงเมื่อมีการบูรณะด้วยเดือยฟันจำนวน 2 อัน



รูปที่ 2 ภาพตัดตามแนวยาวในแนวใกล้กลางไกลกลางแสดงรูปแบบการกระจายความเค้นหลักสูงสุด
Figure 2 Stress distribution by maximum principal stress (MPa) in longitudinal sections.

ภาพตัดขวางบริเวณคอฟันแสดงรูปแบบการกระจายความเค้นหลักสูงสุด (รูปที่ 3) พบว่าทั้งฟันปกติและการบูรณะแบบต่าง ๆ มีรูปแบบการกระจายความเค้นหลักสูงสุดคล้ายคลึงกัน คือ มีความเค้นอัดภายในรากฟันบริเวณคอฟันด้านแก้มมากกว่าบริเวณอื่น ๆ มีระดับความเค้นอัดลดลงบริเวณกึ่งกลางรากฟัน และไล่ระดับเป็นความเค้นดิ่งบริเวณรากฟันด้านลิ้น โดยฟันปกติและฟันที่ได้รับการบูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตมีความเค้นดิ่งกระจายเป็นบริเวณกว้างทางด้านลิ้นมากกว่าการ

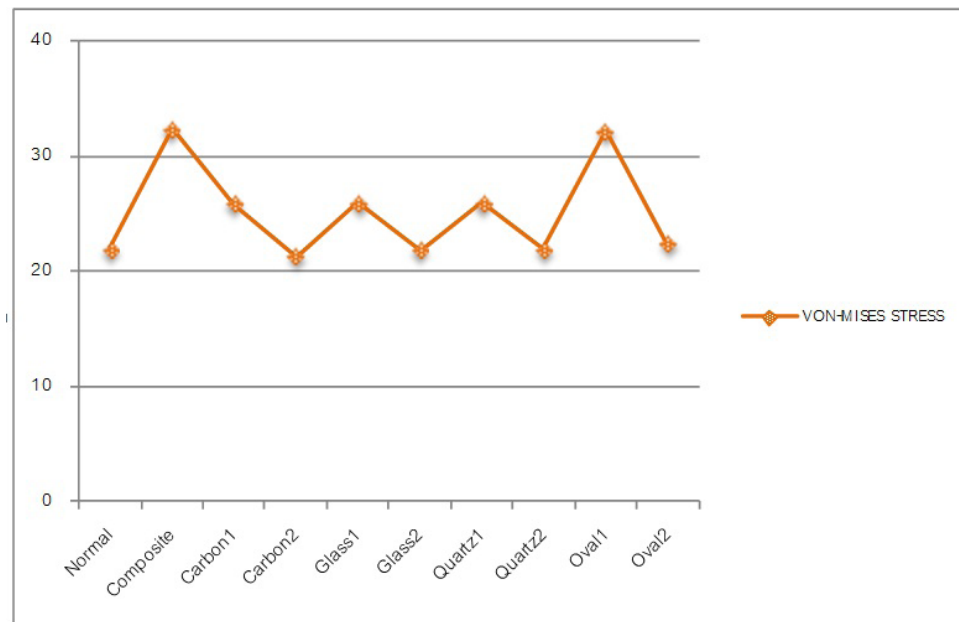
บูรณะแบบอื่น ส่วนการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยแบบต่าง ๆ พบว่าการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรีมีการสะสมความเค้นอัดทางด้านแก้มมากกว่าเดือยฟันชนิดอื่น ส่วนเดือยฟันเส้นใยแก้วและเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมมีการสะสมความเค้นอัดใกล้เคียงกัน แต่น้อยกว่าเดือยฟันเส้นใยคาร์บอนและเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรี



รูปที่ 3 ภาพตัดตามขวางแสดงการกระจายความเค้นหลักสูงสุด
Figure 3 Stress distribution by maximum principal stress (MPa) in cross-sections.

เมื่อพิจารณาถึงความเค้นผสมรวม (von-Mises stress) (รูปที่ 4) พบว่าการบูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตและการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรีจำนวน 1 อัน เกิดการสะสมความเค้นผสมรวมใกล้เคียงกันและมากที่สุด รองลงมาคือการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยคาร์บอน เดือยฟันเส้นใยแก้วและ

เดือยฟันเส้นใยในควอตซ์หน้าตัดกลมจำนวน 1 อัน ซึ่งทั้ง 3 แบบมีปริมาณความเค้นผสมรวมใกล้เคียงกัน การบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยจำนวน 2 อัน ทุกชนิดมีการสะสมความเค้นผสมรวมน้อยที่สุดในปริมาณใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับฟันปกติ

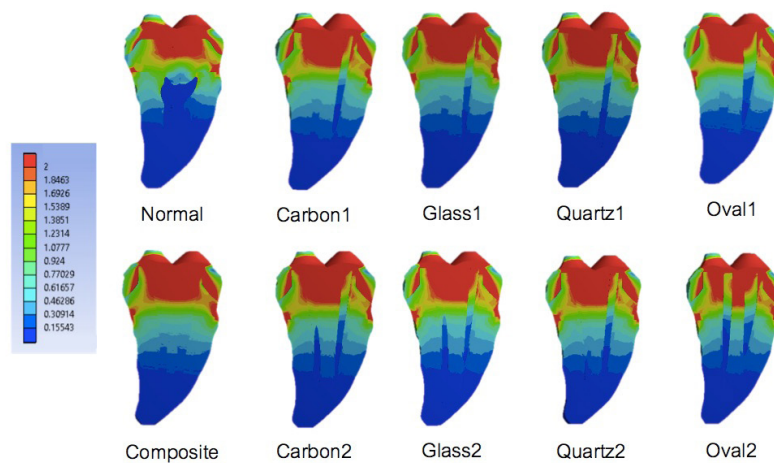


รูปที่ 4 ความเค้นผสมรวมเมื่อมีการบูรณะแบบต่าง ๆ

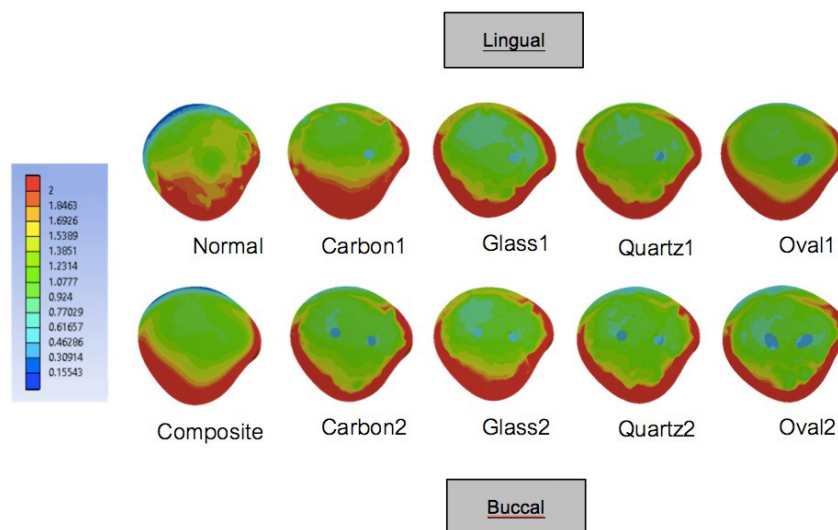
Figure 4 von-Mises stress (MPa) of various restorations.

จากภาพตัดตามยาวในแนวใกล้กลางไกลกลางแสดงการกระจายความเค้นผสมรวม (ภาพที่ 5) เมื่อมีการบูรณะแบบต่าง ๆ มีรูปแบบการกระจายและปริมาณการสะสมของความเค้นผสมรวมที่ไม่แตกต่างกัน ส่วนภาพตัดขวางแสดงการกระจายความเค้นผสมรวม (ภาพที่ 6) พบว่าการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 อัน มีรูปแบบการกระจายและปริมาณการสะสมความเค้นผสมรวมในรากฟันบริเวณคอฟันมากที่สุด การบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 อัน การบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้วจำนวน 1 และ 2 อัน และการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยควอตซ์ทั้งหน้าตัดกลมและหน้าตัดวงรี

ทั้งจำนวน 1 และ 2 อัน มีรูปแบบการกระจายและปริมาณการสะสมความเค้นผสมรวมภายในรากฟันเป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ส่วนการสะสมความเค้นผสมรวมภายในเดือยฟัน พบว่าเดือยฟันเส้นใยแก้วทั้งจำนวน 1 และ 2 อัน มีปริมาณความเค้นผสมรวมภายในเดือยฟันมากกว่าเดือยฟันชนิดอื่น



รูปที่ 5 ภาพตัดตามแนวยาวในแนวใกล้กลางไกลกลางแสดงการกระจายความเค้นผลรวม
 Figure 5 Stress distribution by von-Mises stress (MPa) in longitudinal sections.



รูปที่ 6 ภาพตัดตามขวางแสดงการกระจายความเค้นผลรวม
 Figure 6 Stress distribution by von-Mises stress (MPa) in cross-sections.

บทวิจารณ์

วิธีการศึกษาการกระจายความเค้นในพื้นที่ผ่านการรักษาคลองรากฟันเมื่อได้รับการบูรณะแบบต่าง ๆ ที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่ง คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis, Finite element method) ซึ่งเป็นการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วกำหนดค่าของวัสดุแต่ละชนิดและลักษณะของแรงที่กระทำต่อฟัน จากนั้นโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะประมวลผลการกระจายและปริมาณความเค้นแสดงผลในรูปแบบภาพ มีข้อดีกว่าการศึกษาทางห้องปฏิบัติการแบบอื่น คือ สามารถกำหนดความซับซ้อนของระบบคลองรากฟัน สามารถเปลี่ยนแปลงค่าของวัสดุ กำหนดความหนาของ

รากฟันและปัจจัยต่าง ๆ ที่ต้องการควบคุมและสามารถทำซ้ำได้อย่างไร้ที่ติตามสมบัติของวัสดุ แรงที่ใช้ในการทดสอบและแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นไม่สามารถแสดงสถานะที่เกิดขึ้นจริงทางคลินิกได้ทั้งหมด ซึ่งถือเป็นข้อด้อยของวิธีการศึกษา¹⁵

การศึกษานี้ทำในฟันกรามล่างซี่ที่ 2 ที่มีภาพตัดขวางของคลองรากฟันเป็นรูปอักษรซี โดยมีการควบคุมปัจจัยทางด้านรูปร่างของคลองรากฟันและลักษณะภายนอกของฟันในแบบจำลองที่ได้รับการบูรณะให้เหมือนกัน รวมถึงขนาดและรูปร่างของเดือยฟันเส้นใยหน้าตัดกลมชนิดต่าง ๆ ให้เหมือนกัน เพื่อศึกษาถึงผลของวัสดุบูรณะต่อการกระจายความเค้น ทำการ

ศึกษาโดยการให้แรงทางด้านบดเคี้ยวด้วยหัวกรรปรางทรงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เพื่อจำลองให้เป็นเสมือน ปุ่มฟันคู่สบของฟันหลังซึ่งมีจุดสบมากกว่า 1 จุด และทำการ ศึกษาถึงความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นผลรวม เนื่องจาก ความเค้นหลักสูงสุดจะแสดงถึงความเค้นอัด และความเค้นดึงที่ เกิดขึ้นสูงสุดภายในโครงสร้างที่ทำการศึกษา ซึ่งวัสดุแต่ละชนิด จะมีคุณสมบัติต้านทานต่อความเค้นอัดและความเค้นดึงแตกต่างกันไปทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าบริเวณใดมีแนวโน้มที่จะเกิด การแตกหักจากความเค้นอัดหรือความเค้นดึง ส่วนความเค้น ผลรวมเป็นการบอกถึงภาพรวมของความเค้นทั้งหมดที่เกิดขึ้น ภายในโครงสร้างที่ทำการศึกษา ซึ่งบริเวณที่เกิดการสะสมของ ความเค้นผลรวมมากที่สุดมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกหักได้^{10,16}

กรณีที่มีการบดเคี้ยวด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิต Brito-Júnior และคณะ¹⁰ พบว่าการบดเคี้ยวด้วยแกนฟันเรซิน คอมโพสิตให้ผลการกระจายความเค้นหลักสูงสุดและความเค้น ผลรวมใกล้เคียงกับการบดเคี้ยวด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้ว ส่วน การศึกษาของ Chatvanitkul และ Lertchirakarn⁹ พบว่าการ บดเคี้ยวด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตให้ผลการกระจายความเค้น หลักสูงสุดดีกว่าการบดเคี้ยวด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้ว แต่จากการ ศึกษาครั้งนี้พบว่า การบดเคี้ยวด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิตเกิดการ สะสมความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นผลรวมเป็นปริมาณ มากที่สุด สามารถอธิบายได้ว่าวัสดุเรซินคอมโพสิตมีค่ามอดูลัส ของยังที่น้อยกว่าเนื้อฟัน ส่งผลให้วัสดุมีความยืดหยุ่นที่มาก กว่าเนื้อฟัน เมื่อบดเคี้ยวอยู่ภายในคลองรากฟันที่มีขนาดใหญ่ และมีความโค้งงอของผนังคลองรากฟัน มีความหนาของผนัง คลองรากฟันในตำแหน่งต่าง ๆ ที่แตกต่างกันมากกว่ารากฟัน ซี่อื่น ทำให้มีความไม่สม่ำเสมอของความยืดหยุ่นของเนื้อฟันที่ จะรองรับการกระจายความเค้นที่จะเกิดขึ้น อาจมีผลให้มีการ สะสมของความเค้นดึงในปริมาณที่มากขึ้นในบริเวณที่ผนังคลอง รากฟันบางและคลองรากฟันโค้ง⁵

เมื่อบดเคี้ยวด้วยเดือยฟันเส้นใยชนิดต่าง ๆ จำนวน 1 อัน พบว่าชนิดของเส้นใยมีผลต่อรูปแบบการกระจายและปริมาณ การสะสมความเค้น โดยเดือยฟันเส้นใยแก้วและเดือยฟันเส้นใย ควอตซ์มีการสะสมของความเค้นหลักสูงสุดและความเค้นผล รวมเป็นปริมาณที่น้อยกว่าเดือยฟันเส้นใยคาร์บอนสอดคล้อง กับการศึกษาของ Piyachon และคณะ¹¹ ซึ่งวิเคราะห์ไฟไนต์ เอลิเมนต์ในแบบจำลองคลองรากฟันรูปอักษรซี พบว่าเดือยฟัน เส้นใยแก้วมีการสะสมความเค้นผลรวมน้อยกว่าเดือยฟันเส้นใย คาร์บอนและเดือยฟันไทเทเนียม แต่มีความแตกต่างกันกับการ ศึกษาในที่ตำแหน่งของการสะสมของความเค้นผลรวม คือ การ

ศึกษาของ Piyachon และคณะ¹¹ พบว่ามีการสะสมความเค้น ผลรวมมากที่สุดที่เดือยฟันและเนื้อฟันบริเวณปลายรากฟัน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากวิธีการสร้างแบบจำลองเพื่อมาวิเคราะห์ด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีวิธีที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ผลการ ศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Lanza และคณะ¹⁷ และการศึกษาของ Maceri และคณะ¹⁶ ซึ่งทั้งสองการศึกษาพบ ว่าฟันที่ได้รับการบดเคี้ยวด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้วมีค่าความเค้น ผลรวมเป็นปริมาณที่น้อยกว่าการบดเคี้ยวด้วยเดือยฟันเส้นใย คาร์บอน เนื่องจากเดือยฟันเส้นใยแก้วมีค่ามอดูลัสของยังที่ น้อยกว่าทำให้เกิดการกระจายความเค้นได้ดีกว่า ส่วนเดือยฟัน เส้นใยแก้วและเดือยฟันเส้นใยควอตซ์ พบว่ามีปริมาณการสะสม ของความเค้นที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการกระ กระจายความเค้น พบว่าเดือยฟันเส้นใยแก้วมีการกระจายความเค้น ระดับต่ำกว่าเดือยฟันเส้นใยควอตซ์ โดยเดือยฟันเส้นใยควอตซ์ จะเกิดความเค้นอัดบริเวณเนื้อฟันในส่วนของคอฟันด้านแก้ม เป็นปริมาณที่มากกว่า สอดคล้องกับการศึกษาของ Bessone และ Fernandez¹⁸ ที่พบว่าเดือยฟันเส้นใยแก้วมีการกระจาย และการสะสมความเค้นได้ดีกว่าเดือยฟันเส้นใยควอตซ์

ลักษณะรูปร่างของเดือยฟันที่ใช้ในการบดเคี้ยวมีผลต่อ รูปแบบการกระจายและปริมาณการสะสมความเค้นหลักสูงสุด และความเค้นผลรวม โดยการศึกษาของ Er และคณะ³ ใน ฟันที่มีรูปร่างหน้าตัดคลองรากฟันเป็นวงรี พบว่าเดือยฟันที่มี รูปร่างหน้าตัดวงรีมีรูปแบบการกระจายและปริมาณการสะสม ความเค้นผลรวมในปริมาณที่ต่ำกว่าเดือยฟันที่มีรูปร่างหน้า ตัดกลม เนื่องจากเดือยฟันหน้าตัดวงรีจะมีขนาดพอดีกับคลอง รากฟัน ซึ่งได้มีการศึกษาก่อนหน้านี้¹⁹ พบว่าการใช้เดือยฟันที่มี ขนาดพอดีกับคลองรากฟันจะช่วยเพิ่มค่าความต้านทานต่อการ แตกหักของฟัน แต่ในการศึกษานี้กรณีที่มีการบดเคี้ยวด้วยเดือย ฟันจำนวน 1 อัน พบว่าเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมมีการ สะสมความเค้นดึงและความเค้นอัดเป็นปริมาณที่น้อยกว่าเดือย ฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรี และเมื่อมีการบดเคี้ยวด้วยเดือยฟัน จำนวน 2 อัน พบว่าเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมและหน้า ตัดวงรีมีรูปแบบการกระจายและปริมาณการสะสมความเค้นใน ปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดยเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรีจะ เกิดการสะสมของความเค้นอัดในเนื้อฟันบริเวณคอฟันด้านแก้ม เป็นปริมาณที่มากกว่าเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลม คาดว่า เกิดจากการที่เดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมมีสัดส่วนของ ฟันที่สัมผัสกับผนังคลองรากฟันต่อพื้นที่ที่ไม่สัมผัสมากกว่า เดือยฟันเส้นใยหน้าตัดวงรี

นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนของเดือยฟันที่ใช้ในการ

บูรณะส่งผลต่อการกระจายและการสะสมของความเค้น โดยการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยทุกประเภทในการศึกษานี้จำนวน 2 อัน จะมีปริมาณความเค้นสะสมลดลงเมื่อเทียบกับการบูรณะด้วยเดือยฟันชนิดเดียวกันจำนวน 1 อัน และมีปริมาณความเค้นใกล้เคียงกับฟันปกติ สอดคล้องกับการศึกษาของ Maceri และคณะ¹⁶ พบว่าการบูรณะด้วยเดือยฟันหลายอันมีรูปแบบการกระจายความเค้นที่ใกล้เคียงกับฟันปกติและช่วยลดการสะสมของความเค้นที่บริเวณเนื้อฟัน ซึ่งได้มีการศึกษาของ Newman และคณะ⁴ พบความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของไฟเบอร์ต่อเรซินจะมีลักษณะแปรผันตรงกับค่าความต้านทานต่อการแตกหักของฟัน ดังนั้นการใช้เดือยฟันจำนวน 2 อัน ทำให้สัดส่วนของไฟเบอร์เพิ่มขึ้นซึ่งจะช่วยเพิ่มค่าความต้านทานต่อการแตกหักของฟัน

เดือยฟันเส้นใยแก้วเกิดการสะสมความเค้นผสมรวมภายในเดือยฟันมากที่สุด คาดว่าเกิดจากการที่เดือยฟันเส้นใยแก้วมีความยืดหยุ่นที่มากกว่าทำให้เกิดการกระจายความเค้นในทิศทางต่าง ๆ ส่งผลให้ค่าความเค้นผสมรวมมีค่ามากขึ้น ซึ่งควรต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคตถึงคุณสมบัติการกระจายความเค้นในแนวแกนต่าง ๆ ของวัสดุที่นำมาใช้ในการบูรณะ

จากการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าการบูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิต เดือยฟันเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 อัน และเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรีจำนวน 1 อัน เกิดการสะสมของความเค้นดิ่งเป็นปริมาณมากกว่าการบูรณะแบบอื่น ๆ (รูปที่ 2 และ 3) การสะสมของความเค้นดิ่งเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากบริเวณคอฟัน ซึ่งการที่เกิดการสะสมความเค้นดิ่งเป็นปริมาณมาก ทำให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายของโครงสร้างฟันบริเวณคอฟันที่เรียกว่า แอ็บแฟรคชัน (abfraction) ซึ่งมีสาเหตุจากความเค้นอัดและความเค้นดิ่งของแรงบดเคี้ยวที่สะสมบริเวณคอฟันด้านแก้ม หรืออาจทำให้เกิดการแตกหักของตัวฟันและวัสดุบูรณะได้ เนื่องจากได้มีการศึกษาพบว่าเคลือบฟัน เนื้อฟัน และวัสดุทางทันตกรรมบางชนิด เช่น วัสดุเรซินคอมโพสิต สามารถทนต่อความเค้นดิ่งก่อนที่จะเกิดการแตกหักได้เป็นปริมาณที่ต่ำกว่าความเค้นอัด^{10,20} ดังนั้นการบูรณะด้วยแกนฟันเรซินคอมโพสิต การบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยคาร์บอน จำนวน 1 อัน และเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดวงรี จำนวน 1 อัน มีความเสี่ยงในการเกิดการแตกหักได้มากกว่าการบูรณะแบบอื่น ๆ

การสะสมของความเค้นอัดเป็นปริมาณมากภายในรากฟันบริเวณคอฟันทางด้านแก้มมีความเป็นไปได้ว่าจะเป็นจุดเริ่มต้นในการแตกหักของฟัน คาดว่าเกิดจากการที่ตำแหน่งและทิศทางของแรงที่กดลงที่ด้านบดเคี้ยวอยู่ทางด้านแก้ม 2 ตำแหน่ง

และด้านลิ้น 1 ตำแหน่ง ทำให้เกิดแรงกดทางด้านแก้มเป็นปริมาณที่มากกว่าทำให้เกิดเป็นความเค้นอัดทางด้านแก้มและความเค้นดิ่งทางด้านลิ้น ประกอบกับการที่มีตำแหน่งของกระดูกอยู่ล้อมรอบรากฟันและเป็นตำแหน่งที่คงที่ ทำให้บริเวณของสันกระดูกเข้าฟันเป็นเสมือนจุดหมุนเมื่อมีแรงมากระทำทำให้เกิดการสะสมของความเค้นเป็นปริมาณมากบริเวณคอฟัน ซึ่งการเกิดการสะสมของความเค้นดิ่งและความเค้นอัดบริเวณคอฟันในการศึกษานี้มีปริมาณที่ต่ำกว่าค่าความเค้นอัดและความเค้นดิ่งสูงสุดที่เคลือบฟันและเนื้อฟันสามารถคงรูปร่างเดิมได้โดยไม่เกิดการแตกหัก²⁰ แต่การที่เกิดความเค้นดิ่งและความเค้นอัดในปริมาณต่ำแต่เกิดในลักษณะซ้ำ ๆ จะทำให้เกิดการแตกของเคลือบฟันหรือเนื้อฟันบริเวณคอฟันในลักษณะตั้งฉากกับแนวแกนฟัน²¹ ดังนั้นในการบูรณะฟันให้กับผู้ป่วยควรทำการตรวจสอบตำแหน่งในการสบฟันให้มีความสมดุลทางด้านแก้มและด้านลิ้น รวมถึงความยาวของเดือยฟันที่ใส่ในคลองรากฟันต้องมีการพิจารณาร่วมกับตำแหน่งของสันกระดูกเข้าฟัน กล่าวคือควรมีความยาวของเดือยฟันลึกในคลองรากฟันให้ต่ำกว่าระดับสันกระดูกเข้าฟัน เนื่องจากเมื่อมีแรงบดเคี้ยวกระทำต่อฟันตำแหน่งของสันกระดูกเข้าฟันจะเป็นจุดหมุน หากเดือยฟันอยู่ระดับเหนือต่อยอดสันกระดูกเข้าฟัน ก็จะทำให้เกิดความเค้นอัดและความเค้นดิ่งต่อรากฟันเป็นปริมาณมากกว่าขีดจำกัดความล้า (fatigue limit) ก็จะทำให้เกิดการแตกหักของฟันขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากมีการแตกหักหรือเกิดแอ็บแฟรคชันที่บริเวณใกล้คอฟันถือเป็นความเสียหายที่มีความรุนแรงไม่มากและอาจสามารถให้การบูรณะฟันขึ้นใหม่ได้

การศึกษาโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการศึกษาถึงรูปแบบการกระจายและปริมาณการสะสมความเค้นโดยการกำหนดให้วัสดุภายในคลองรากฟันเกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์และทุกผิวสัมผัสของวัสดุมีการยึดติดกันอย่างสมบูรณ์ แต่ในทางคลินิกกระบวนการใช้สารยึดติดภายในคลองรากฟันอาจเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากความซับซ้อนของเนื้อฟันที่จะทำการยึดติดภายในคลองรากฟัน ความยากในการควบคุมความชื้นและความเข้มแสงที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดกระบวนการแข็งตัว¹⁰ รวมถึงการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและส่วนประกอบต่าง ๆ ของฟันเป็นไอโซโทรปิกซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเส้นตรงและเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในความเป็นจริงวัสดุและส่วนประกอบต่าง ๆ ของฟัน อย่างเช่น เนื้อฟัน ไม่ได้มีคุณสมบัติเป็นเส้นตรงและเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด และลักษณะของแรงบดเคี้ยวที่กระทำต่อฟันนั้นจะมีความซับซ้อนหลายทิศทาง ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษานี้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากสถานการณ์จริงทางคลินิก

ได้ นอกจากนี้ในคลินิกหากมีการบูรณะด้วยเดือยฟันที่มีรูปร่างแตกต่างไปจากในการศึกษานี้ การกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นอาจจะมีผลแตกต่างไปจากการศึกษานี้ เนื่องจากรูปร่างและขนาดของเดือยฟันมีผลต่อการกระจายความเค้นที่จะเกิดขึ้น อีกทั้งในการศึกษานี้เป็นการศึกษาในฟันกรามล่างซี่ที่ 2 ที่มีภาพตัดขวางบริเวณรากฟันส่วนต้นเป็นคลองรากฟันโค้งต่อเนื่องเป็นรูปอักษรซี มีการแยกของคลองรากฟันที่บริเวณกึ่งกลางของรากฟัน ซึ่งลักษณะของคลองรากฟันที่มีภาพตัดขวางเป็นรูปอักษรซีมิได้หลากหลายรูปแบบ ดังนั้นลักษณะรูปแบบการกระจายและปริมาณการสะสมความเค้นที่ได้จากการศึกษานี้เป็นผลลัพธ์ของฟันที่มีลักษณะรูปร่างคลองรากฟันตามที่กำหนดเท่านั้น ดังนั้นควรที่จะมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปในอนาคตถึงรูปแบบการกระจายและปริมาณการสะสมความเค้นในคลองรากฟันที่มีภาพตัดขวางเป็นรูปอักษรซีในรูปแบบอื่น

บทสรุป

จากการศึกษาโดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ในกรณีของฟันกรามล่างซี่ที่ 2 ที่มีภาพตัดขวางของคลองรากฟันส่วนต้นโค้งต่อเนื่องเป็นรูปอักษรซีโดยไม่มีการแยกคลองรากฟัน และมีลักษณะของคลองรากฟันเป็นแบบที่ 1 เมื่อพิจารณาจากภาพรังสีนั้น ภายใต้อำนาจของการศึกษานี้ พบว่าการบูรณะด้วยเดือยฟันเส้นใยแก้วหรือเดือยฟันเส้นใยควอตซ์หน้าตัดกลมจำนวน 2 อัน มีปริมาณของความเค้นที่เกิดขึ้นต่ำกว่าการบูรณะแบบอื่น ๆ ในการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

1. Vire D. Failure of Endodontically Treated Teeth : Classification and Evaluation. *J Endod* 1991;17:338-42.
2. Schwartz RS and Robbins JW. Post Placement and Restoration of Endodontically Treated Teeth: A Literature Review. *J Endod* 2004;30:289-301.
3. Er O, Kilic K, Esim E, Aslan T, Kilinc HI, Yildirim S. Stress Distribution of Oval and Circular Fiber Posts in Amandibular Premolar : A Three-Dimensional Finite Element Analysis. *J Adv Prosthodont* 2013;5:434-39.
4. Newman MP, Yaman P, Dennison J, Rafter M, Billy E. Fracture Resistance of Endodontically Treated Teeth Restored with Composite Posts. *J Prosthet Dent*

2003;89:360-7.

5. Lertchirakarn V, Palamara JEA, Messer HH. Patterns of Vertical Root Fracture: Factors Affecting Stress Distribution in the Root Canal. *J Endod* 2003;29:523-8.
6. Jafarzadeh H, Wu YN. The C-shaped Root Canal Configuration: A Review. *J Endod* 2007;33:517-23.
7. Gulabivala K, Opasanon A, Ng YL, Alavi A. Root and canal morphology of Thai mandibular molars. *Int Endod J* 2002;35:56-62.
8. Chai WL, Thong YL. Cross-sectional morphology and minimum canal wall widths in C-shaped roots of mandibular molars. *J Endod* 2004;30:509-12.
9. Chatvanitkul C, Lertchirakarn V. Stress Distribution with Different Restorations in Teeth with Curved Roots: A Finite Element Analysis Study. *J Endod* 2010;115-18.
10. Brito-Júnior M, Pereira RD, Verissimo C, Soares CJ, Fariae-Silva AL, Camilo CC, et al. Fracture resistance and stress distribution of simulated immature teeth after apexification with mineral trioxide aggregate. *Int Endod J* 2014;47:958-66.
11. Piyachon C, Hansapinyo S, Khongkhunthianh P. Finite Element Analysis of Stress Distribution in C-shaped Root Canals Restored with Different Prefabricated Post Systems. Proceedings of the 7th Srinakharinwirot Vichakarn; 2004 April 1-2; Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand;2004. p.209-19.
12. Fan B, Cheung GS, Fan M, Gutmann JL, Fan W. C-shaped Canal System in Mandibular Second Molars: Part II—Radiographic Features. *J Endod* 2004;30:904-8.
13. Lazari PC, de Oliveira RCN, Anchieta RB, de Almeida EO, Freitas Junior AC, Kina S, et al. Stress distribution on dentin-cement-post interface varying root canal and glass fiber post diameters. A three-dimensional finite element analysis based on micro-CT data. *J Appl Oral Sci* 2013;21:511-7.
14. Soares PV, Santos-Filho PCF, Queiroz EC, Araújo TC, Campos RE, Araújo CA, et al. Fracture Resistance and Stress Distribution in Endodontically Treated Maxillary Premolars Restored with Composite Resin. *J Prosthodont* 2008;17:114-9.

15. AL-Omiri MK, Mahmoud AA, Rayyan MR, Abu-Ham-mad O. Fracture resistance of teeth restored with post-retained restorations: an overview. *J Endod* 2010;36:1439-49.
16. Maceri F, Martignoni M, Vairo G. Mechanical Behav-iour of Endodontic Restorations with Multiple Prefab-ricated Posts: A Finite-element Approach. *J Biomech* 2007;40:2386-98.
17. Lanza A, Aversa R, Rengo S, Apicella D, Apicella A. 3D FEA of Cemented Steel, Glass and Carbon Posts in a Maxillary Incisor. *Dent Mater* 2005;21:709-15.
18. Bessone L, Fernandez BE Jr. Evaluation of different post systems: finite element method. *Int J Odontos-tomat* 2010;4:229-36.
19. Latempa AMA, Almeida SA, Nunes NF, da Silva EM, Guimarães JGA, Poskus LT. Techniques for Restoring Enlarged Canals: An Evaluation of Fracture Resistance and Bond Strength. *Int Endod J* 2015;48:28-36.
20. Zelic K, Vukicevic A, Jovicic G, Aleksandrovic S, Fili-povic N, Djuric M. Mechanical weakening of devitalized teeth: three-dimensional Finite Element Analysis and prediction of tooth fracture. *Int Endod J* 2015;48:850-63.
21. Sarode GS, Sarode SC. Abfraction: A review. *J Oral Maxillofac Pathol* 2013;1:222-7.