

การตรวจการสร้างภาพการทำงานของสมอง (fMRI)

ในผู้ป่วยโรคปวดเส้นประสาทไตรเจมินัล: รายงานผู้ป่วย 1 ราย

ปณัสดา อวิคุณประเสริฐ¹, วรินทร์ พุทธรักษ์², ศรัณยา จารุชัยนิวัฒน์², ชีมาญ พลังกูร จอร์น³, สุไมตรี สีส่วน³, อรการณ สืบสมาน³, ไฉแก้ว ประทับสิงห์³, อำนาจ กิจควรดี⁴

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น

²ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น

³ภาควิชาชีววิทยาช่องปาก คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น

⁴ภาควิชาศัลยศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น

Functional MRI of Patient with Trigeminal Neuralgia: A Case Report

Panatsada Awikunprasert¹, Warinthorn Phuttharak², Saranya Jaruchainiwat², Teekayu Plangkul Jorn³, Sumaitree Seesuan³, Orakan Seubsaman³, Jaikaew Pratabsihn³, Amnat Kitkaundee⁴

¹Department of Physics, Faculty of Science, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

²Department of Radiology, Faculty of Medicine, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

³Faculty of Dentistry, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

⁴Department of Surgery, Faculty of Medicine, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

หลักการและวัตถุประสงค์: โรคปวดเส้นประสาทไตรเจมินัล หรือ Trigeminal neuralgia (TN) เป็นอาการปวดที่เกิดขึ้นที่ใบหน้า กระหม่อม ขากรรไกรบนและล่างตามแนวของเส้นประสาทสมองคู่ที่ห้า ซึ่งมีหน้าที่รับความรู้สึกสัมผัสและความร้อน ความเย็นและความรู้สึกเจ็บปวด อาการปวดจะมีลักษณะพิเศษ คือ ปวดเฉียบพลันและรุนแรง ปัจจุบันยังไม่พบวิธีการรักษาที่ดีที่สุด เนื่องจากขึ้นกับลักษณะและอาการของผู้ป่วยแต่ละราย

วิธีการศึกษา: รายงานผู้ป่วยหญิง อายุ 58 ปี มีอาการปวดทุกครั้งเมื่อแปรงฟันและล้างหน้า ทดสอบระดับความเจ็บปวดเฉลี่ยเท่ากับ 7 ในบริเวณเส้นประสาทไตรเจมินัลคู่ที่ห้า (V₂) ได้รับการวินิจฉัยว่ามีอาการของโรค TN ที่ด้านขวาเข้ารับการตรวจวินิจฉัยด้วยวิธีการตรวจการสร้างภาพการทำงานของสมอง (fMRI) ได้รับการกระตุ้นปวดด้วยการสัมผัสเบาๆ ด้วยแปรงนุ่ม เพื่อหาสาเหตุของการปวด

ผลการศึกษา: พบความแตกต่างของการทำงานของสมองด้านที่ปวดและไม่ปวด โดยตำแหน่งการปวดจะอยู่ในบริเวณ anterior insular cortex และ thalamus

สรุป: ผลที่ได้จะช่วยเพิ่มความเข้าใจกลไกการปวดของโรค TN และการนำวิธีการตรวจ fMRI ในขณะที่มีการปวดสามารถช่วยในการวินิจฉัยโรค และคัดแยกอาการปวดที่เกิดจากเส้นประสาทไตรเจมินัลและการปวดจากสาเหตุอื่นๆ สามารถ

Background and Objective: Trigeminal neuralgia (TN) is a chronic pain condition that affects the trigeminal nerve causing severe intermittent sharp shooting pain the orofacial area. Nowadays, the best treatment has not been purposed because it depends on individual's pain characteristic.

Method: A case report of 58 years old Thai female presented with tooth brushing and washing her face normally triggered the pain. Sensory test of the maxillary branch (V₂) of trigeminal nerve showed a sign of allodynia with the average pain severity measured by visual analog scale was 7. She was diagnosed with right classical trigeminal neuralgia. She underwent brain fMRI to identify the cause of pain.

Results: The fMRI brain study was done with mechanical stimulation (brush) revealed that there were differences between pain and non-pain sides. The pain locations were active at anterior insular cortex and the Thalamus.

Conclusions : The beneficial of this study might offer the chance of understanding the mechanism of TN pain. An alternative diagnostic tool, functional Magnetic

*Corresponding author:

วรินทร์ พุทธรักษ์ ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ต.ในเมือง อ.เมือง จ. ขอนแก่น, 40002

นำไปใช้ในการศึกษาผลของยาที่ใช้รักษาอาการปวดจากโรคปวดหน้า

คำสำคัญ : โรคปวดเส้นประสาทไตรจีมินัล ฟังก์ชันนอลเอ็มอาร์ไอ โรคปวดหน้า

Resonance Imaging (fMRI) can help to diagnosis, to classify the reasons of pain and to study the effect of drug used in TN patient.

Key words: Trigeminal neuralgia, Functional MRI, Facial pain

ศรีนครินทร์เวชสาร 2558; 30 (4): 397-402. ♦ Srinagarind Med J 2015; 30 (4): 397-402.

บทนำ

โรคปวดเส้นประสาทไตรจีมินัล หรือ Trigeminal neuralgia (TN) เป็นอาการปวดที่เกิดที่ใบหน้า กระหม่อม ขากรรไกรบนและล่าง ตามแนวของเส้นประสาทสมองคู่ที่ห้า ซึ่งมีหน้าที่รับความรู้สึกสัมผัสความร้อน ความเย็นและความรู้สึกเจ็บปวด อาการปวดจะมีลักษณะพิเศษ คือ ปวดเฉียบพลัน และรุนแรง ระยะเวลาเพียงไม่กี่วินาทีถึง 2 นาที คล้ายการถูกไฟช็อตเป็นพักๆ และมักจะปวดมากขึ้นเวลาเคี้ยว พูด ล้างหน้า หรือสัมผัสเบาๆ บางครั้งอาการปวดเกิดขึ้นรุนแรงจนไม่สามารถรับประทานอาหารหรือดื่มน้ำได้ สำหรับประเทศไทย ได้มีการศึกษาความชุกของโรคนี้เมื่อปี พ.ศ. 2549 พบว่า เกิดในเพศหญิงร้อยละ 57 ชายร้อยละ 43 คิดเป็นอัตราส่วน เพศหญิงต่อเพศชาย 1.3:1¹ สาเหตุของอาการปวดเนื่องมาจากเส้นประสาทสมองคู่ที่ห้าถูกกดทับจากเส้นเลือดเล็กๆ ที่มีการหย่อนยานตามอายุหรือจากเนื้องอก เมื่อเส้นประสาทถูกกดทับจะทำให้เส้นประสาทเกิดการนำกระแสประสาทมากขึ้น จึงมีอาการปวดอย่างเฉียบพลันและรุนแรง สำหรับแนวทางหลักการรักษา ได้แก่ การรักษาด้วยยา แต่ประมาณ 1/4 ของผู้ป่วยยังมีอาการปวด และเกิดผลข้างเคียง² ในผู้ป่วยเอเชียมีโอกาสดังกล่าวอย่างรุนแรงได้ นอกจากนี้ กลไกการออกฤทธิ์ของยาชนิดนี้ต่อโรค TN ยังไม่แน่ชัด ในปัจจุบันการรักษาทางคลินิก เช่น การผ่าตัด การรักษาโดยใช้รังสีแกมมาและการแพทย์วิธีอื่นๆ ยังไม่พบวิธีการรักษาที่ดีที่สุดเนื่องจากขึ้นกับลักษณะและอาการของผู้ป่วยแต่ละราย^{3, 4}

การนำเทคนิคการสร้างภาพด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (MRI) เพื่อใช้ในการตรวจวินิจฉัยรอยโรคของผู้ป่วย และประโยชน์ในการรักษาและติดตามผลการรักษานั้น มีข้อดีคือ ผู้ป่วยจะไม่ได้รับรังสี เนื่องจากใช้หลักการของการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีความถี่จำเพาะ (radiofrequency) เข้าไปกระตุ้นระบบอวัยวะที่ต้องการตรวจ (ซึ่งประกอบด้วย อะตอมของไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่) เมื่ออวัยวะนั้นๆ ถูกกระตุ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานตามกระบวนการทางฟิสิกส์ที่เรียกว่า การกำทอน (resonance) หลังจากหยุดกระตุ้นอะตอมไฮโดรเจนจะคายพลังงาน

เมื่อใช้อุปกรณ์รับสัญญาณที่ได้ออกมา และผ่านกระบวนการประมวลผลจะได้สัญญาณภาพบนจอภาพ⁵ ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ MRI มีประโยชน์ในการวินิจฉัยสาเหตุการเกิดโรค TN ในผู้ป่วย เช่น เนื้องอกในสมองกดทับเส้นประสาท หรือหลอดเลือดกดหรือ สัมผัสกับเส้นประสาทสมองคู่ที่ห้า ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดโรคปวดประสาทสมองคู่ที่ห้าที่พบบ่อยที่สุดในผู้ป่วย TN⁶ Borsook และคณะใช้วิธีการสร้างภาพการทำงานของสมอง (functional brain imaging) ในขณะที่มีอาการปวดเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระบบการประมวลผลและการตอบสนองของระบบประสาทในสมองของมนุษย์ การตรวจการสร้างภาพการทำงานของสมองโดยอาศัยหลักการกำทอนของแม่เหล็กหรือฟังก์ชันนัลเอ็มอาร์ไอ (functional magnetic resonance imaging, fMRI) เป็นการวัดการทำงานของระบบประสาทส่วนกลาง (CNS activation) ทางอ้อม โดยวัดการเปลี่ยนแปลงระดับออกซิเจน (blood oxygen level dependent, BOLD) ในบริเวณต่างๆ ของสมอง เช่น trigeminal ganglion, spinal trigeminal nucleus, thalamus และ somatosensory cortex ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของกลไกการปวดจากการใช้ตัวกระตุ้นที่ต่างกัน⁷ ประโยชน์ที่ได้จากวิธีการนี้ คือ การวินิจฉัยและการรักษาอาการปวดที่เกิดจากเส้นประสาทไตรจีมินัลและการปวดจากไมเกรน รวมถึงการศึกษาผลของยาที่ใช้รักษาอาการปวดจากโรคปวดหน้า⁴ เช่นการศึกษาของ Scrivani และคณะ ได้ทำการศึกษาผลของยา Lamotrigine ร่วมกับการใช้ fMRI เป็นครั้งแรก⁸

กรณีศึกษา

ผู้ป่วยหญิงไทย หม้าย อายุ 58 ปี ภูมิลำเนาจังหวัดแพร่ ได้รับการส่งตัวมาเพื่อรับการรักษาเพิ่มเติม เนื่องจากมีอาการปวดแสบบริเวณปีกจมูกด้านขวาคล้ายกับไฟฟ้าช็อตเกิดขึ้นครั้งละประมาณ 5 วินาที มีอาการเป็นพักๆ จะมักมีอาการเวลาล้างหน้าในเวลาเช้า การสัมผัสใบหน้า และเมื่อถูกลมพัดขณะขับรถจักรยานยนต์ ผู้ป่วยจึงไปถอนฟันกราม

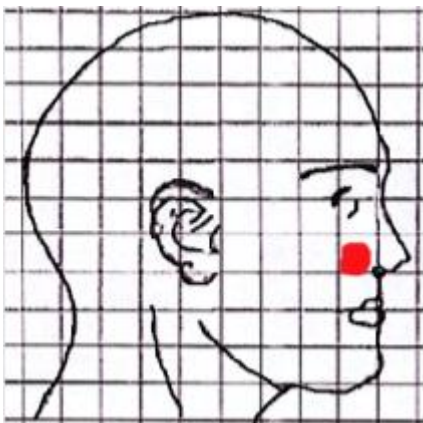
น้อยซีที 2 ด้านซ้ายไปประมาณ 4 เดือน แต่หลังจากถอนฟันแล้ว อาการปวดยังไม่หายไป ได้รับการรักษาเบื้องต้นด้วยยา Carbamazepine ขนาด 200 มิลลิกรัมต่อเม็ด ครั้งละ 1 เม็ด วันละ 2 ครั้ง (เช้าและเย็น) พบว่าอาการดีขึ้นและมีการง่วงมีนเล็กน้อยในเวลากลางวัน ไม่มีอาการแพ้ จากการตรวจร่างกายพบว่า ความดันเลือดปกติ สัญญาณชีพปกติ ผู้ป่วยไม่มีโรคประจำตัว มีความผิดปกติของเส้นประสาทสมองคู่ที่ห้า (V_2) ด้านขวา ให้การวินิจฉัยว่า โรค TN ผลการตรวจทางห้องปฏิบัติการ พบว่า CBC แรกรับ WBC 4,600/mm³ (ค่าปกติ 5,000-10,000/mm³), Hb 10.2 g%, Hct 32.2%, MCV 72.7 fL, MCH 23.0 pg, MCHC 31.6 g/dL, RDW 13.8 %, plt 171,000/mm³, N 57%, L 37%, B 0%, normal coagulogram ผลการตรวจทางห้องปฏิบัติการอื่นๆ Sodium 138 mmol/L, Potassium 4.0 mmol/L, Chloride 100 mmol/L, CO₂ 30 mmol/L, FBS 92 mg/dl, Cholesterol 135 mg% (ค่าปกติ 150-250mg%) Triglyceride 129 mg%, HDL 32 mg/dl, LDL 78, SGOT 27 U/L, SGPT 15 U/L

เมื่อวัดระดับความเจ็บปวด (visual analog scale, VAS) ขณะตรวจ พบว่า VAS=3 แต่จะมี VAS=10 ขณะล้างหน้าตอนเช้า ระดับความเจ็บปวดเฉลี่ยในสัปดาห์ที่ผ่านมา VAS=7 (รูปที่ 1)

การเก็บข้อมูล fMRI

เนื่องจากการตรวจด้วยเทคนิค MRI เป็นข้อปฏิบัติในผู้ป่วยใหม่ทุกรายเพื่อหาสาเหตุของอาการ TN การตรวจ fMRI ของผู้ป่วยได้รับการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์มหาวิทยาลัยขอนแก่น เลขที่โครงการ HE561377

ผู้ป่วยได้รับการตรวจตามมาตรฐานการตรวจ MRI ของ trigeminal nerve เพื่อหาความผิดปกติของสมอง และสร้างภาพ fMRI สมองผู้ป่วยจากเครื่อง MRI Philips



รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งที่ผู้ป่วยมีอาการปวด

รุ่น Achieva 3.0Tx เก็บข้อมูลโดยตั้งค่าขนาดวอกเซล (voxel) เท่ากับ 2.4x2.4x2.4 มิลลิเมตร³ ขนาดเมตริก (matrix) =96x96 และขนาดพื้นที่แสดงภาพ (field of view, FOV) เท่ากับ 230 มิลลิเมตร ความหนาของสไลด์ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ค่า TR/TE = 3000/35 มิลลิวินาที การเก็บข้อมูล fMRI แบ่งเป็น 2 ระยะ คือ ระยะพัก (rest) และระยะกระตุ้นการปวดโดยการสัมผัสเบาๆ ด้วยแปรงนุ่ม (brush stimulation) โดยเริ่มต้นเก็บภาพในระยะพักเป็นเวลา 15 วินาที ตามด้วยการกระตุ้น 2 วินาที และเก็บภาพขณะที่สมองถูกกระตุ้น เป็นเวลา 15 วินาที โดยทำการกระตุ้นด้านที่ไม่ปวด 3 ครั้ง สำหรับการเก็บข้อมูลด้านที่ผู้ป่วยมีอาการปวด เมื่อผู้ป่วยการตอบสนองต่อการกระตุ้นเพียง 1 ครั้ง จะหยุดการกระตุ้นและเก็บข้อมูล fMRI จากนั้น เปรียบเทียบด้านที่ผู้ป่วยมีอาการปวดและไม่ปวด (รูปที่ 2)

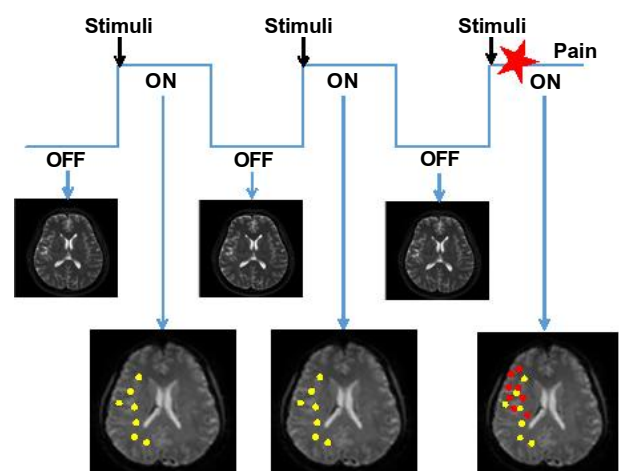
ผลการวินิจฉัย

ผลการวินิจฉัยภาพ MRI สมอง จากภาพ MRI ไม่แสดงบริเวณที่มีเนื้องอกในบริเวณเส้นประสาทไตรเจมินัล (รูปที่ 3)

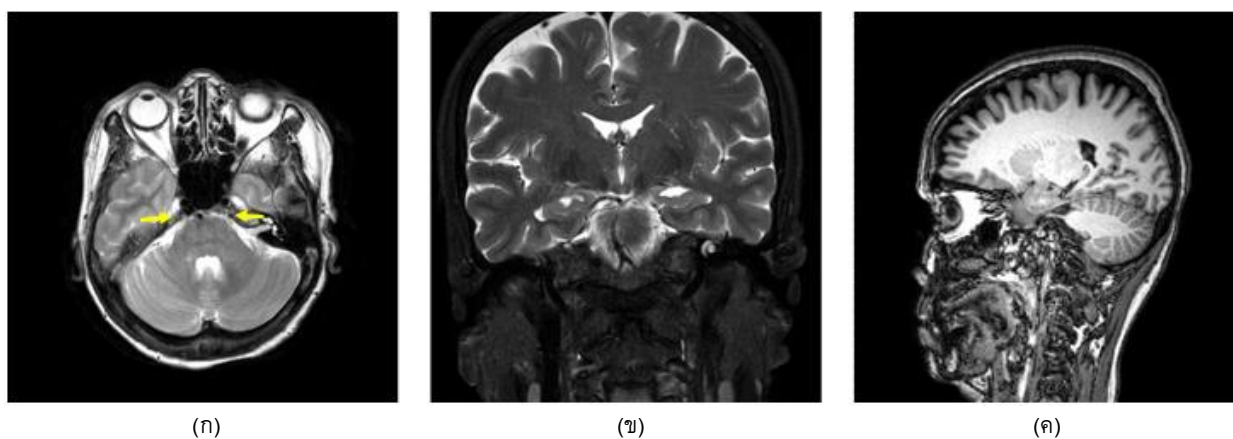
สำหรับภาพ fMRI พบความแตกต่างของการทำงานของสมองด้านที่ไม่ปวด (รูปที่ 4) และด้านที่ปวด (รูปที่ 5) โดยตำแหน่งการปวดจะอยู่ในบริเวณ anterior insular cortex และ Thalamus

วิจารณ์

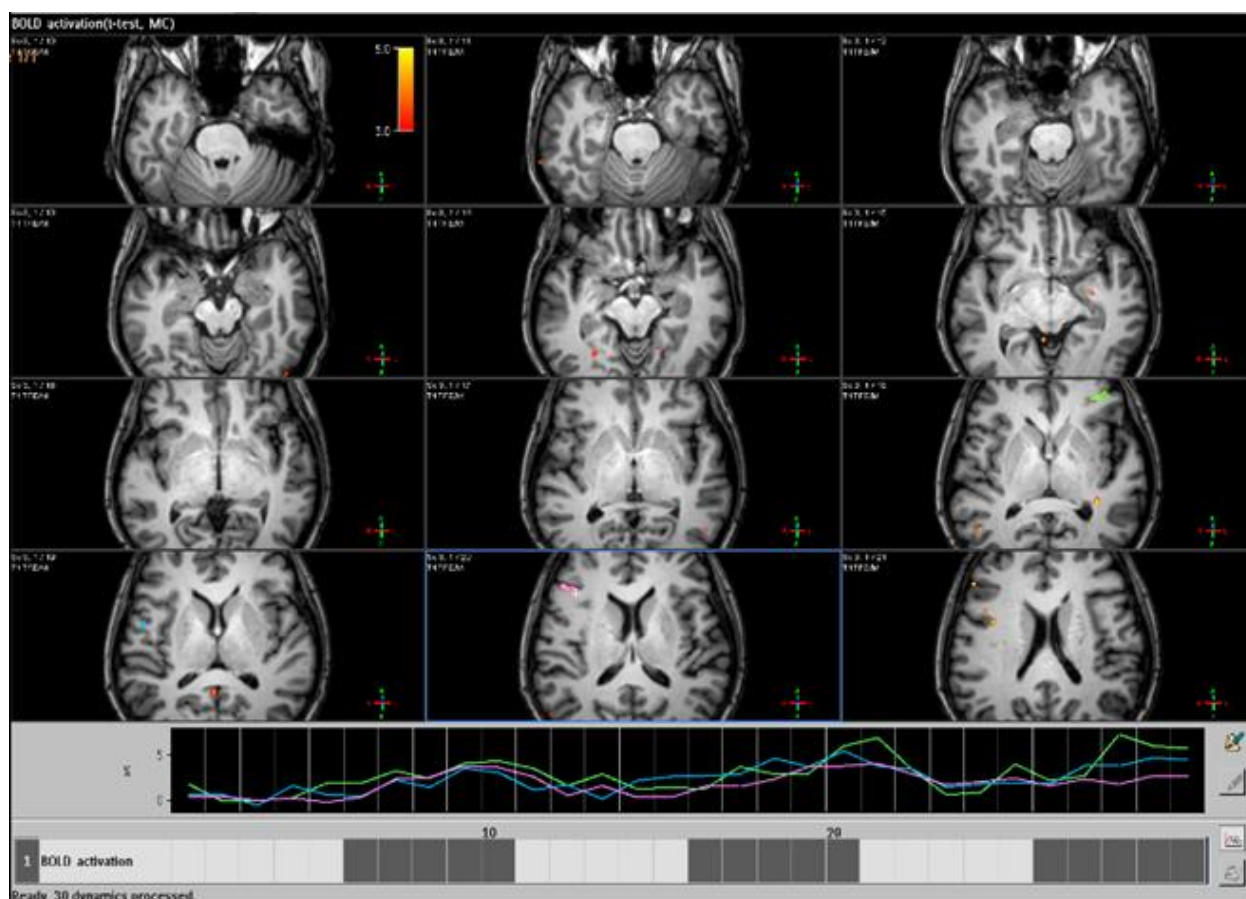
รายงานผู้ป่วยโรค TN การตรวจด้วย MRI สามารถแยก



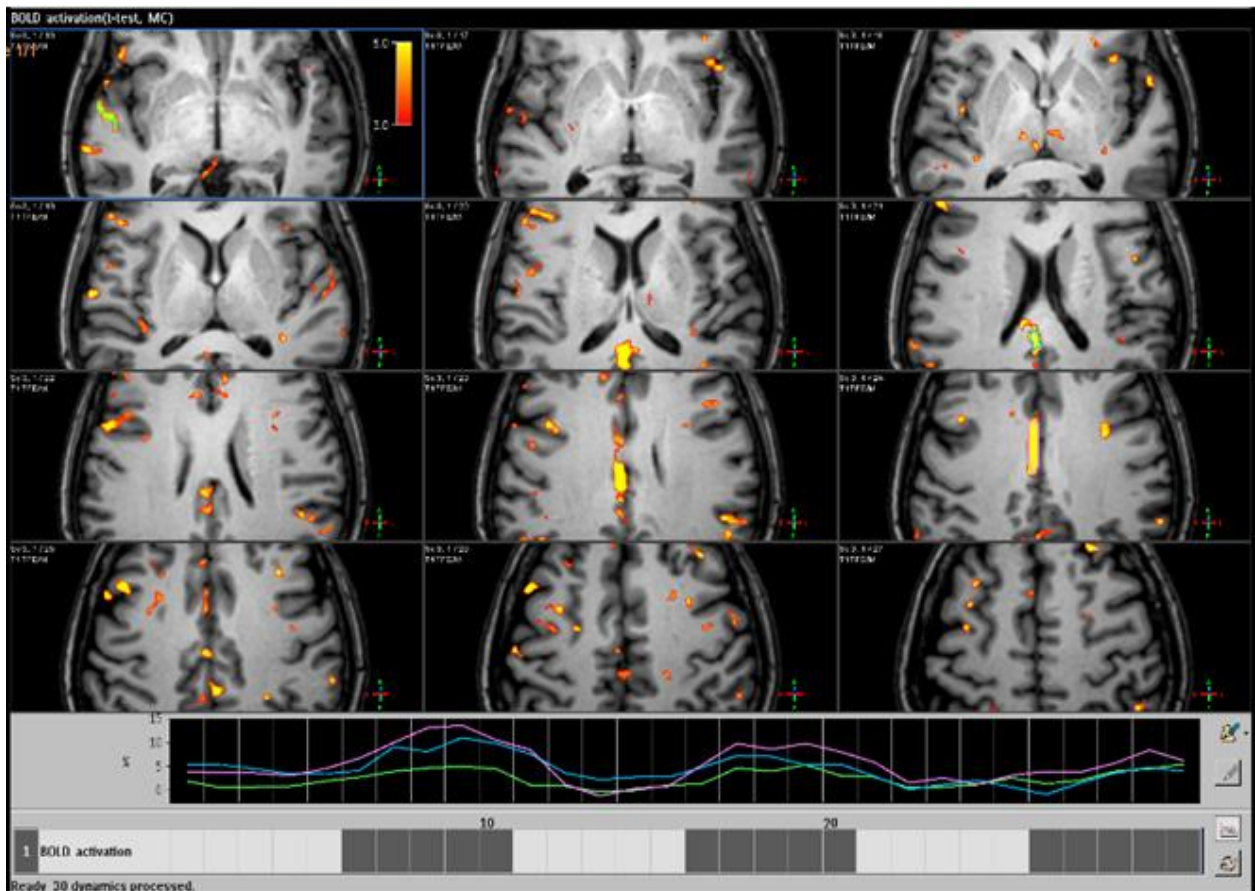
รูปที่ 2 แผนภาพจำลองการเก็บข้อมูลภาพ fMRI โดยเริ่มเก็บข้อมูลระยะพัก (OFF) เป็นเวลา 15 วินาที และ ตามด้วยการให้การกระตุ้น (stimuli) เป็นเวลา 2 วินาที และ เก็บข้อมูลภาพ (ON) เป็นเวลา 15 วินาที และหยุดกระตุ้น เมื่อผู้ป่วยมีอาการปวด



รูปที่ 3 T2 weighted MRI ของสมอง ทั้ง 3 ระนาบ (ก) axial และลูกศรชี้ตำแหน่งของเส้นประสาทไตรเจมินัล (ข) coronal และ (ค) sagittal



รูปที่ 4 การทำงานของสมองในขณะที่ได้รับการกระตุ้นในข้างที่ไม่มีอาการปวด



รูปที่ 5 การทำงานของสมองในขณะที่ได้รับการกระตุ้นอาการปวด ซึ่งแสดงบริเวณที่สมองมีการทำงานในขณะที่ปวดในบริเวณสีส้ม ซึ่งแสดงถึงบริเวณ anterior insular cortex และ Thalamus

ได้ว่า อาการปวดที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากเนื้อเยื่อถูกกดทับเส้นประสาท และจากการตรวจด้วยวิธีการ fMRI มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของการทำงานของสมองในผู้ป่วย TN ด้านที่ปวดและไม่ปวด และเพื่อคัดแยกสาเหตุของการปวด ผลการศึกษาของสมองด้านที่ปวดและไม่ปวด พบว่าสมองทั้งสองด้านมีการทำงานต่างกัน เมื่อให้การกระตุ้นในด้านที่มีอาการปวดสมองจะทำงานต่างกันที่ตำแหน่ง anterior insular cortex และ thalamus เป็นตำแหน่งที่สมองมีการใช้ออกซิเจนมาก หรือมีกิจกรรมของสมอง (brain activity) มากกว่าตำแหน่งอื่น เมื่อเปรียบเทียบกับอาการปวดที่เกิดขึ้นจากโรคไมเกรน ซึ่งมีการทำงานของสมองตำแหน่ง cerebral cortex⁹ พบว่า แตกต่างกัน เนื่องจากสมองที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการปวดอยู่ที่บริเวณ somatosensory cortex, thalamus, insular และ anterior cingulate cortex¹⁰ โดยที่สมองส่วน anterior cingulate cortex นั้นทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับความรับรู้ตัวอารมณ์¹¹ รับรู้ความปวด¹² และตอบสนองทางอารมณ์ต่อความปวด¹³ สำหรับบริเวณ thalamus นั้นเป็นศูนย์รวมกระแสที่ผ่านเข้าออก และแยกกระแสประสาทไปยังสมองที่

เกี่ยวกับกระแสประสาทนั้น จากการศึกษาพบว่ามีความแตกต่างของสมองด้านที่ปวดและไม่ปวดบริเวณ anterior insular cortex และ thalamus ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Reddi และคณะ¹⁰ และ Silva และคณะ¹⁴ ที่พบว่าการทำงานของสมองที่ปวดในตำแหน่ง somatosensory cortex, thalamus, insular, และ anterior cingulate cortex^{14, 15}

สรุป

ผลการศึกษาการทำงานของสมองผู้ป่วยโรค TN โดยใช้วิธีการ fMRI ในผู้ป่วย 1 ราย แสดงความแตกต่างของสมองด้านที่ปวดและไม่ปวด และบริเวณ anterior insular cortex และ Thalamus เป็นตำแหน่งที่สมองมีการใช้ออกซิเจนมาก ในขณะที่ปวด ซึ่งเป็นบริเวณที่แตกต่างจากอาการปวดที่เกิดจากโรคไมเกรนโปรโตคอลวิธีการตรวจด้วยวิธีการ fMRI สามารถนำไปใช้ในการศึกษาอื่นๆ ต่อไป เช่น การศึกษาความสัมพันธ์ของระดับความปวด หรือการศึกษากลไกการออกฤทธิ์และการตอบสนองต่อยาหรือวิธีการรักษาต่างๆ ได้

เอกสารอ้างอิง

1. มุกดา ศิริเทพทวี, ที่ษมา พลังกูร จอร์นัส, อีระศักดิ์ ดำรงรุ่งเรือง, ภัทธณณ กาญจนบุษย์. อาการปวดประสาทโทรเจมินัล: รายงานผู้ป่วย 3 ราย. วิทยาสารทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2547; 54: 205-13.
2. Jorns TP, Johnston A, Zakrzewska JM. Pilot study to evaluate the efficacy and tolerability of levetiracetam (Keppra) in treatment of patients with trigeminal neuralgia. *Eur J Neurol* 2009; 16: 740-4.
3. Bennetto L, Patel NK, Fuller G. Trigeminal neuralgia and its management. *BMJ* 2007; 334: 201-5.
4. Stankewitz A, Voit HL, Bingel U, Peschke C, May A. A new trigemino-nociceptive stimulation model for event-related fMRI. *Cephalalgia* 2010; 30: 475-85.
5. Shiel WCJ. Magnetic Resonance Imaging (MRI Scan). 2012 [Cited Nov 20, 2012]; Available from: http://www.medicinenet.com/mri_scan/article.htm.
6. Yang J ST, Ruprecht A, Meng D, Vincent SD, Yuh WT. Magnetic resonance imaging used to assess patients with trigeminal neuralgia. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1996; 81: 343-50.
7. Borsook D, Burstein R, Becerra L. Functional imaging of the human trigeminal system: Opportunities for new insights into pain processing in health and disease. *J Neurobiol* 2004; 61: 107-25.
8. Scrivani S, Wallin D, Moulton EA, Cole S, Wasan AD, Lockerman L, et al. A fMRI Evaluation of Lamotrigine for the Treatment of Trigeminal Neuropathic Pain: Pilot Study. *Pain Med* 2010; 11: 920-41.
9. Nosedá R, Burstein R. Migraine pathophysiology: Anatomy of the trigeminovascular pathway and associated neurological symptoms, cortical spreading depression, sensitization, and modulation of pain. *Pain* 2013; 154: 44-53.
10. Reddi D. An introduction to pain pathways and mechanisms [Cited Aug 24, 2014]; Available from: <https://www.ucl.ac.uk/anaesthesia/StudentsandTrainees/PainPathwaysIntroduction>.
11. Lane RD, Reiman EM, Axelrod B, Yun LS, Holmes A, Schwartz GE. Neural correlates of levels of emotional awareness. Evidence of an interaction between emotion and attention in the anterior cingulate cortex. *J Cogn Neurosci* 1998; 10: 525-35.
12. Davis KD, Taylor SJ, Crawley AP, Wood ML, Mikulis DJ. Functional MRI of pain- and attention-related activations in the human cingulate cortex. *J Neurophysiol* 1997; 77: 3370-80.
13. Price DD. Psychological and neural mechanisms of the affective dimension of pain. *Sci* 2000; 288: 1769-72.
14. DaSilva AF, Becerra L, Makris N, Strassman AM, Gonzalez RG, Geatrakis N, et al. Somatotopic activation in the human trigeminal pain pathway. *J Neurosci* 2002; 22: 8183-92.
15. Murray PD, Keller A. Somatosensory response properties of excitatory and inhibitory neurons in rat motor cortex. *J Neurophysiol* 2011; 106: 1355-62.

