

การวิเคราะห์การกลายพันธุ์บริเวณไทโรซีนไคเนสโดเมนของยีนอีจีเอฟอาร์ ของผู้ป่วยมะเร็งปอดใน
ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย

Mutation Analysis at Tyrosine Kinase Domain of *EGFR* Gene of Lung Cancer Patients in
The Upper Northern Thailand

เอกพงศ์ รุ้ทำนอง (Ekkapong Roothumnong)* นิรัชร์ เลิศประเสริฐสุข (Nirush Lertprasertsuke)** สมเจริญ แซ่เต็ง
(Somcharoen Saeteng)*** กนกกาญจน์ บำรุงกิจ (Kanokkan Bumroongkit)**** สุมิตรา ทองประเสริฐ
(Sumitra Thongprasert)***** ดาวรุ่ง กังวานพงศ์ (Daoroon Kangwanpong)*****

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุบัติการณ์การกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* บริเวณ tyrosine kinase domain ที่เอ็กซอน 18, 19 และ 21 ในผู้ป่วยมะเร็งปอดในเขตภาคเหนือตอนบนของไทย โดยสกัดดีเอ็นเอจากตัวอย่างเนื้อเยื่อมะเร็งปอดชนิด non-small-cell lung cancer จำนวน 68 ราย และเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอของเอ็กซอนทั้งสามด้วยวิธี PCR ก่อนนำไปวิเคราะห์ลำดับเบส ผลการศึกษาพบการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* รวม 10 ชนิด ในผู้ป่วย 18 ราย (ร้อยละ 26.47) ซึ่งการกลายพันธุ์ 6 ชนิดเคยมีรายงานมาก่อนแล้วคือ delE746 – A750, delL747 – S752insQ, A839T, V851I, E868G และ L858R ส่วนอีก 4 ชนิด เป็นการกลายพันธุ์ที่ค้นพบใหม่ ได้แก่ L688F, A722T, G724D และ P848S การกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* มีความสัมพันธ์กับผู้ป่วยเพศหญิง ($P=0.0038$) หรือพยาธิสภาพพื้นฐานเนื้อเยื่อแบบ adenocarcinoma ($P=0.0343$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การศึกษานี้ทำให้ทราบถึงอุบัติการณ์การกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* ในกลุ่มผู้ป่วยมะเร็งปอดในเขตภาคเหนือของไทย

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the incidence of *EGFR* mutation at tyrosine kinase domain in exon 18, 19 and 21 among the upper northern Thai lung cancer patients. Cancerous tissues obtained from 68 non-small cell lung cancer patients were subjected to DNA extraction, amplification of DNA regions encompassing the three *EGFR* exons of interest by polymerase chain reaction, and followed by direct sequencing. Ten *EGFR* mutations were found in 18 out of 68 patients (26.47%). Six of which, delE746 – A750, delL747 – S752insQ, A839T, V851I, E868G and L858, were previously reported mutations. The other four, L688F, A722T, G724D and P848S, were novel mutations. *EGFR* mutation status was statistic significant associated with female ($P=0.0038$) or adenocarcinoma ($P=0.0343$) subtype. This study reports the incidence of *EGFR* gene mutations in the upper northern Thai lung cancer patients.

คำสำคัญ : ยีนอีจีเอฟอาร์ มะเร็งปอด ภาคเหนือตอนบนของไทย

Key Words : *EGFR*, lung cancer, upper northern Thailand

* มหาวิทยาลัย หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พญ. ภาควิชาพยาธิวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

*** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพ. ภาควิชาศัลยศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

**** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชากายวิภาคศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

***** ศาสตราจารย์ พญ. ภาควิชาอายุรศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

***** รองศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

บทนำ

มะเร็งปอด จัดเป็นปัญหาสำคัญทางด้านสาธารณสุขของประเทศไทย โดยเฉพาะในประชากรที่อาศัยอยู่ทางภาคเหนือ ซึ่งพบอุบัติการณ์ของโรคโดยเฉลี่ยสูงกว่าประชากรที่อาศัยอยู่ในภูมิภาคอื่นๆ เป็นอย่างมาก (Khuhaprema, 2007; Cancer Unit: Maharaj Nakorn Chiang Mai Hospital, 2007) จากสถิติผู้ป่วยมะเร็งปอดที่เข้ารับการรักษาที่โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ผ่านมา พบมะเร็งปอดชนิด non-small-cell lung cancer (NSCLC) มากที่สุด ประกอบด้วย adenocarcinoma ร้อยละ 42.6 รองลงมาคือ squamous cell carcinoma ร้อยละ 33.0 และ large cell carcinoma ร้อยละ 2.9 ส่วนมะเร็งปอดชนิด small-cell lung cancer (SCLC) พบได้ร้อยละ 12.4 นอกจากนี้ยังพบมะเร็งปอดที่ไม่สามารถจำแนกชนิดได้ อีกร้อยละ 9.1 ผู้ป่วยมากกว่าร้อยละ 80 ที่มาพบแพทย์มักมีการแพร่กระจายของโรคแล้ว (Deesomchok *et al.*, 2005) การรักษาใช้ยาเคมีบำบัดมาตรฐานเป็นหลัก ในปัจจุบันนอกจากการรักษาด้วยยาเคมีบำบัดมาตรฐานแล้ว ยาที่ใช้รักษาแบบมุ่งเป้า (targeted therapy) เช่น gefitinib หรือ erlotinib ซึ่งเป็นยาในกลุ่ม epidermal growth factor receptor – tyrosine kinase inhibitors (EGFR-TKIs) ได้เข้ามามีบทบาทในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งปอดมากขึ้น ยากลุ่มนี้ทำหน้าที่ยับยั้งการทำงานของโปรตีน EGFR (Hynes and Lane, 2005) ซึ่งเป็นโปรตีนในกลุ่ม receptor tyrosine kinase ที่แปลรหัสมาจากยีน *EGFR*

ยีน *EGFR* อยู่ที่แขนสั้นของโครโมโซมคู่ที่ 7 ตำแหน่ง 12 (7p12) มีขนาด 188 Kb (NC 000007.12) ประกอบด้วย 28 เอ็กซอน สามารถถอดและแปลรหัสให้โปรตีนขนาด 170 กิโลดัลตัน ซึ่งมี 1,210 กรดอะมิโน (Reiter *et al.*, 2001) ในเซลล์มะเร็งหลายๆ ชนิดที่มีต้นกำเนิดมาจากเซลล์เยื่อบุผิว เช่น มะเร็งเต้านม มะเร็งศีรษะและคอ รวมถึงมะเร็งปอดชนิด NSCLC มักมีการแสดงออกของยีน *EGFR* หรือมีการกระตุ้นการทำงานของโปรตีน EGFR ในระดับที่สูงกว่าปกติ ส่งผล

ให้เซลล์เพิ่มการแบ่งตัว ด้านทานการตายของเซลล์แบบ apoptosis เพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของเซลล์เนื้องอก รวมถึงส่งเสริมการสร้างเส้นเลือดใหม่ (Arteaga, 2002) กลไกเหล่านี้จะส่งเสริมกระบวนการพัฒนาและการดำรงชีวิตของเซลล์มะเร็ง จึงทำให้เกิดแนวคิดผลิตภัณฑ์ยามะเร็งที่มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของโปรตีน EGFR ขึ้น

ยา gefitinib (Iressa[®]) เป็นยาในกลุ่ม EGFR-TKIs ตัวแรกที่เข้ามามีบทบาทในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งปอด (Cohen *et al.*, 2003) จากการศึกษาวิจัยคลินิกระยะที่ 2 ของโครงการ IDEAL-1 และ IDEAL-2 พบว่ายา gefitinib ให้ผลด้านเนื้องอกมะเร็งปอด ในผู้ป่วยประมาณร้อยละ 12–19 (Fukuoka *et al.*, 2003; Kris *et al.*, 2003) จากผลดังกล่าวทำให้องค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (FDA) ให้การรับรองแบบเร่งด่วนแก่ยา gefitinib ในเดือนพฤษภาคม ปี ค.ศ. 2003 (Cohen *et al.*, 2003) จากนั้นยา gefitinib ก็เข้าสู่การวิจัยคลินิกระยะที่ 3 อีกหลายๆ โครงการ ซึ่งพบว่าผู้ป่วยเชื้อชาติเอเชียมีการตอบสนองดีกว่าผู้ป่วยเชื้อชาติอื่นๆ และกลุ่มผู้ป่วยที่ตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา gefitinib มักเป็นชนิด adenocarcinoma หรือเป็นเพศหญิง หรือไม่มีประวัติการสูบบุหรี่ (Ciardiello and Tortora, 2008; Toschi and Cappuzzo, 2007)

การแสดงออกของโปรตีน EGFR เป็นเป้าหมายชีวโมเลกุลอย่างแรก ซึ่งใช้ศึกษาการตอบสนองต่อยา แต่กลับพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองของผู้ป่วยที่รักษาด้วยยา gefitinib (Bailey *et al.*, 2003) ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาถึงกลไกในระดับความผิดปกติของยีน และพบว่าการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* หลายๆ ชนิดในเซลล์มะเร็งที่เอ็กซอน 18, 19 และ 21 ซึ่งอยู่ใน tyrosine kinase domain มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองที่ดีต่อการรักษาด้วยยา gefitinib (Lynch *et al.*, 2004; Paez *et al.*, 2004) และล่าสุด งานวิจัยคลินิกระยะที่ 3 โครงการ IPASS ซึ่งศึกษาโดยใช้ยา gefitinib รักษาตั้งแต่เริ่มแรก (first-line)

เปรียบเทียบกับ การรักษาด้วยยาเคมีบำบัดมาตรฐาน carboplatin/paclitaxel โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกเฉพาะ ผู้ป่วยชาวเอเชียที่เป็นมะเร็งชนิด NSCLC แบบ adenocarcinoma ซึ่งมีอาการอยู่ในขั้น III B หรือ IV ไม่มีประวัติการสูบบุหรี่ และยังไม่เคยได้รับการรักษาด้วยยาเคมีบำบัดใดๆ ผลการศึกษาพบการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* สูงถึงร้อยละ 59.7 และผู้ป่วยกลุ่มนี้มีอัตราการตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา gefitinib มากกว่าร้อยละ 70 เมื่อวิเคราะห์ระยะเวลาการรอดชีวิตโดยโรคไม่ก้าวหน้าต่อ (progression-free survival) ของกลุ่มผู้ป่วยที่มีการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* พบว่าผู้ป่วยที่ได้รับยา gefitinib มีระยะเวลายาวนานกว่ากลุ่มผู้ป่วยที่ได้รับยาเคมีบำบัดมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.001$) (Mok *et al.*, 2009)

ยาในกลุ่ม EGFR-TKIs อีกชนิดหนึ่งที่เข้ามามีบทบาทในการรักษาผู้ป่วยมะเร็งปอดก็คือ ยา erlotinib (Tarceva®) ซึ่งมีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของโปรตีน EGFR เช่นเดียวกับกับยา gefitinib การวิจัยทางคลินิกของยา erlotinib ในผู้ป่วยมะเร็งปอดชนิด NSCLC ที่มีอาการอยู่ในขั้นก้าวหน้า พบว่าผู้ป่วยที่ได้รับยามีอัตราการรอดชีวิตสูงกว่ากลุ่มผู้ป่วยที่ได้รับยาหลอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทำให้ยา erlotinib ได้รับการรับรองจากองค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกาเมื่อเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2004 และเมื่อวิเคราะห์การตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา erlotinib กับลักษณะทางพยาธิวิทยาคลินิก พบว่ามีความสัมพันธ์ต่อกันเช่นเดียวกับผู้ป่วยที่ตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา gefitinib กล่าวคือ เป็นผู้ป่วยเชื้อชาติเอเชีย หรือผู้ป่วยเพศหญิง หรือไม่มีประวัติการสูบบุหรี่ หรือมีพยาธิสภาพแบบ adenocarcinoma (Cohen *et al.*, 2005; Shepherd *et al.*, 2005) นอกจากนี้ Pao *et al.* (2004) ได้ศึกษาการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* บริเวณเอ็กซอน 18 – 24 ซึ่งเป็น tyrosine kinase domain พบว่าการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* บริเวณเอ็กซอน 19 และ 21 มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา erlotinib

จากหลักฐานอ้างอิงที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า การศึกษาการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* บริเวณ tyrosine kinase domain มีความสำคัญ ทั้งในด้านการคัดเลือกผู้ป่วยเข้ารับการรักษาดังกล่าวในผู้ป่วยกลุ่ม EGFR-TKIs และการพยากรณ์โรค ดังนั้นงานวิจัยเพื่อศึกษาการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* ในผู้ป่วยมะเร็งปอดที่อาศัยอยู่ทางภาคเหนือของไทย ซึ่งเป็นบริเวณที่พบอุบัติการณ์ของโรคมะเร็งปอดสูงที่สุด จะทำให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการรักษาผู้ป่วยต่อไปในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* บริเวณ tyrosine kinase domain ที่เอ็กซอน 18, 19 และ 21 จากเนื้อเยื่อปอดมะเร็งปอด ในผู้ป่วยมะเร็งปอดที่อาศัยอยู่ในภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย โดยโครงการวิจัยนี้ได้ผ่านการพิจารณาของคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม 2552

1. ตัวอย่างวิจัย

ใช้ตัวอย่างเนื้อเยื่อมะเร็งปอด (cancerous tissue) ที่เก็บรักษาสภาพในพาราฟิน (formalin fixed and paraffin embedded: FFPE) จำนวน 68 ราย จากผู้ป่วยมะเร็งปอดชนิด NSCLC ที่เข้ารับการรักษานในโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และเนื้อเยื่อดังกล่าวได้ผ่านการวินิจฉัยจากพยาธิวิทยาภาคพยาธิวิทยา คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่แล้ว

2. การสกัดดีเอ็นเอ

นำตัวอย่าง FFPE มาตัดด้วยเครื่อง microtome ให้ได้ความหนา 10 ไมครอน จากนั้นปรับสภาพชิ้นเนื้อด้วยการให้ความร้อนในสารละลายเบส (heat-induced retrieval in alkaline solution) (Shi *et al.*, 2004) แล้วนำมาสกัดดีเอ็นเอด้วยวิธีมาตรฐาน phenol-chloroform

3. การวิเคราะห์การกลายพันธุ์ของยีน *EGFR*

นำดีเอ็นเอที่สกัดได้มาเพิ่มปริมาณของยีน

EGFR ที่เอ็กซอน 18, 19 และ 21 ของ ด้วยเทคนิคพีซีอาร์ โดยใช้ไพรเมอร์จำเพาะดังนี้

EGFR-18F:5'-CCATGTCTGGCACTGCTTTC-3'

EGFR-18R:5'-TGCAAGGACTCTGGGCTCC-3'

EGFR-19F:5'-AGATCACTGGGCAGCATGTG-3'

EGFR-19R:5'-CCAGACATGGAAAAGGTGGG-3'

EGFR-21F:5'-GAACATGACCCTGAATTCGGA-3'

EGFR-21R:5'-TACAGCTAGTGGGAAGGCAGC-3'

จากนั้นวิเคราะห์การกลายพันธุ์ของยีนโดยการหาลำดับเบสทั้ง sense และ antisense strands ของแต่ละเอ็กซอน ด้วยเครื่องหาลำดับเบสอัตโนมัติ MegaBACE™1000 (Amersham Bioscience, USA)

4. การแยกอัลลีลเพื่อวิเคราะห์การกลายพันธุ์ของยีน *EGFR*

นำตัวอย่างผลผลิต PCR ที่คาดว่ามีการกลายพันธุ์ชนิด small deletion/insertion โดยดูจากผลลำดับเบสที่มีการซ้อนกันของ chromatogram มาแยกเก็บ fraction ของอัลลีลที่มีการกลายพันธุ์ ด้วยเทคนิค denaturing high – performance liquid chromatography (DHPLC) โดยใช้เครื่อง Transgenomic WAVE® nucleic acid fragment analysis system (Transgenomic, Omaha, USA) รุ่น 3500HT นำตัวอย่างที่แยกเก็บ fraction ได้ไประเหย buffer ออกโดยใช้เครื่อง SpeedVac (Thermo Scientific, USA) แล้วนำไปหาลำดับเบสเพื่อวิเคราะห์การกลายพันธุ์ต่อไป

5. การวิเคราะห์ผล

นำลำดับเบสของจีโนมมาวิเคราะห์การกลายพันธุ์โดยเปรียบเทียบกับลำดับเบสอ้างอิงของยีน *EGFR* จาก GenBank (NC 000007.12) ด้วยโปรแกรม Mutation Surveyor® 3.25 (SoftGenetics LLC, USA) ส่วนการตรวจสอบการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* ที่เคยมีรายงานแล้วใช้วิธีเทียบกับฐานข้อมูล SM-EGFR-DB (Murray *et al.*, 2008) และ COSMIC (Bamford *et al.*, 2004) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* กับลักษณะทางพยาธิวิทยาคลินิก ด้วย chi-square test

ผลการวิจัย

ตัวอย่างวิจัยจากผู้ป่วย 68 ราย เป็นผู้ป่วยเพศชายร้อยละ 61.8 (42/68) ผู้ป่วยเพศหญิงร้อยละ 38.2 (26/68) มีลักษณะทางพยาธิวิทยาคลินิกเป็น adenocarcinoma ร้อยละ 69.1 (47/68) squamous cell carcinoma ร้อยละ 25 (17/68) และ large cell carcinoma ร้อยละ 5.9 (4/68)

ผลการศึกษาการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* ที่เอ็กซอน 18, 19 และ 21 พบการกลายพันธุ์ 10 ชนิด ในผู้ป่วย 18 ราย (ร้อยละ 26.47) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยเป็นการกลายพันธุ์ที่มีรายงานมาก่อน 6 ชนิด 2 ชนิดพบถึงร้อยละ 50 ได้แก่ delE746–A750, L858R ซึ่งพบในผู้ป่วย 4 และ 5 ราย ตามลำดับ อีก 4 ชนิด พบในผู้ป่วยอย่างละ 1 ราย ได้แก่ delL747 – S752insQ, A839T, V851I และ E868G นอกนั้นยังตรวจพบการกลายพันธุ์ชนิดใหม่ อีก 4 ชนิด ได้แก่ L688F, A722T และ G724D ในผู้ป่วยอย่างละ 1 ราย และ P848S ในผู้ป่วย 2 ราย

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* กับลักษณะทางพยาธิวิทยาคลินิก พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับผู้ป่วยที่เป็นเพศหญิง ($P=0.0038$) หรือมีพยาธิสภาพของเนื้อเยื่อแบบ adenocarcinoma ($P=0.0343$) (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* กับลักษณะทางพยาธิวิทยาคลินิก

ตัวแปร	การกลายพันธุ์ของยีน <i>EGFR</i>		P value
	พบ	ไม่พบ	
เพศ			
ชาย	6	36	0.0038
หญิง	12	14	
พยาธิสภาพของชิ้นเนื้อ			
Adenocarcinoma	16	31	0.0343 ^a
Squamous cell carcinoma	2	15	
Large cell carcinoma	0	4	

^aเปรียบเทียบพยาธิสภาพแบบ adenocarcinoma กับแบบอื่นๆ

อภิปรายผลการวิจัย

อุบัติการณ์การกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* ของผู้ป่วยมะเร็งปอดชนิด NSCLC ที่อาศัยในเขตภาคเหนือของไทย (ร้อยละ 26.47) มีอัตราใกล้เคียงกับฐานข้อมูล SM-EGFR-DB ซึ่งพบร้อยละ 27.61 (Murray *et al.*, 2008) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มผู้ป่วยชาวเอเชียด้วยกัน ซึ่งพบได้ราวร้อยละ 45 (Hsieh *et al.*, 2006; Sakurada *et al.*, 2006) กลับพบว่าอุบัติการณ์ต่ำกว่าและยังแตกต่างกับการศึกษาของ Sriuranpong *et al.* (2006) Shigematsu *et al.* (2005) และ Kosaka *et al.* (2004) ซึ่งพบอุบัติการณ์การกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* ร้อยละ 57.4 (35/61) และประมาณร้อยละ 50 ในผู้ป่วยมะเร็งปอดชนิด adenocarcinoma ที่เป็นชาวไทยและเอเชีย ตามลำดับ การพบอุบัติการณ์การกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* ก่อนข้างต่ำในงานวิจัยนี้ คาดว่าเกิดจากความแตกต่างด้านปัจจัยทางพันธุกรรมของกลุ่มประชากร ดังจะเห็นได้จากอัตราส่วนมะเร็งปอดชนิด adenocarcinoma ซึ่งมีอยู่ถึงร้อยละ 69 แต่พบการกลายพันธุ์ในอัตราต่ำ ขณะที่พบการกลายพันธุ์ในมะเร็งปอดชนิด squamous cell carcinoma ในอัตราที่สูงกว่า (ร้อยละ 13) ที่เคยมีรายงานไว้ว่าพบการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* ในมะเร็งปอดชนิดนี้ (น้อยกว่าร้อยละ 1) (Wiwanitkit, 2006)

ลักษณะทางพยาธิวิทยาคลินิกที่สัมพันธ์กับการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* ในการศึกษาครั้งนี้ สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ศึกษามาก่อนหน้านี้ ซึ่งมักพบในผู้ป่วยเพศหญิง หรือในชั้นเนื้อที่มีพยาธิสภาพแบบ adenocarcinoma (Toschi and Cappuzzo, 2007)

การกลายพันธุ์ที่พบได้บ่อย (common mutation) 2 ชนิด คือ delE746-A750 (c.2235 – 2249del GGAATTAAGAG AAGC หรือ c.2235 – 2249del15) และ L858R (c.2573T>G หรือ p.Leu858Arg) มีรายงานว่า การกลายพันธุ์ทั้งสองชนิดข้างต้นมีความสัมพันธ์กับการตอบสนองที่ดีต่อการรักษาด้วยยาในกลุ่ม EGFR-TKIs โดยพบว่าผู้ป่วยที่มีการกลายพันธุ์ดังกล่าว มีอัตรา

<i>EGFR</i> exon 19: reported delE746 – A750 : c.2235 – 2249del15 (Lynch <i>et al.</i> , 2004)	
<i>EGFR</i> exon 19: reported L858R : c.2573T>G (Lynch <i>et al.</i> , 2004)	
<i>EGFR</i> exon 19 : reported delL747 – S752insQ c.2238-2256del19ins4 (Okami <i>et al.</i> , 2007)	
<i>EGFR</i> exon 21 : reported A839T : c.2515G>A (Huang <i>et al.</i> , 2004)	
<i>EGFR</i> exon 21 : reported V851I : c.2551G>A (Cappuzzo <i>et al.</i> , 2005)	
<i>EGFR</i> exon 21 : reported E868G : c.2603A>G (Hsieh <i>et al.</i> , 2006)	
<i>EGFR</i> exon 18 : novel L688F : c.2062C>T	
<i>EGFR</i> exon 18 : novel G724D : c.2171G>A	
<i>EGFR</i> exon 18 : novel A722T : c.2164G>A	
<i>EGFR</i> exon 21 : novel P848S : c.2542C>T	

ภาพที่ 1 การกลายพันธุ์ของยีน *EGFR*

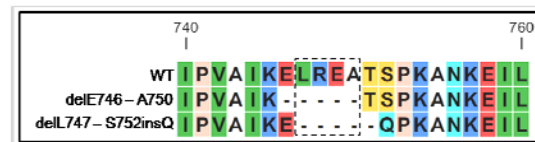
การตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา gefitinib หรือ erlotinib มากกว่าร้อยละ 70 (Yamamoto *et al.*, 2009)

การกลายพันธุ์ที่มีรายงานมาก่อนหน้านี้ อีก 4 ชนิด คือ การกลายพันธุ์ชนิด c.2238-2257 del19ins4 (delL747 – S752insQ) เป็นการกลายพันธุ์แบบ indels ซึ่งเบส 19 ตัวขาดหายไปตำแหน่ง 2,238 – 2,256 (ATTAAGAGAAGCAACATCT) และมีการแทรกเบส GCAA ทำให้เกิด in-frame deletion/ insertion เมื่อแปลรหัสออกมาเป็นโปรตีน ซึ่งจะทำให้กรดอะมิโนที่ตำแหน่ง 747–752 (LREATS) ขาดหายไป และมีการแทรกกรดอะมิโน glutamine (Q) เข้ามา 1 ตัว Okami *et al.* (2007) พบการกลายพันธุ์ดังกล่าวในผู้ป่วยที่ตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา gefitinib

Pao *et al.* (2004) ได้รายงานผลการเปลี่ยนแปลงระดับโปรตีนแบบ delL747 – S752insQ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในระดับดีเอ็นเอที่ต่างกัน คือ c.2239-2256del18insCAA ผู้ป่วยที่มีการกลายพันธุ์แบบนี้ก็ตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา gefitinib ด้วยเช่นกัน เกือบทั้งหมดของการกลายพันธุ์แบบ in-frame deletion/insertion ซึ่งพบได้มากกว่าร้อยละ 45 ของการกลายพันธุ์ทั้งหมด เกิดคร่อมบริเวณ LREA motif (Sharma and Settleman, 2009) ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยพบว่าผู้ป่วยที่มีการกลายพันธุ์บริเวณเอ็กซอน 19 มีการตอบสนองต่อการรักษาด้วยยาในกลุ่ม EGFR-TKIs มากถึงประมาณร้อยละ 86.21 (Murray *et al.*, 2008)

การกลายพันธุ์ชนิด A839T (c.2164G>A หรือ p.Ala839Thr) พบในผู้ป่วย 1 ราย มีการแทนที่เบส G ที่ตำแหน่ง 2,164 ด้วยเบส A (GCA → ACA) ทำให้กรดอะมิโน alanine (A) ที่ codon 839 เปลี่ยนเป็น threonine (T) การกลายพันธุ์แบบ A839T รายงานครั้งแรกโดย Huang *et al.* (2004) และพบในผู้ป่วยที่มีการตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา gefitinib

การกลายพันธุ์ชนิด V851I (c.2551G>A หรือ p.Tyr851Ile) พบว่ามีรายงานการวิจัยของการกลายพันธุ์ชนิดนี้ที่ไม่เกี่ยวข้องกัน 2 ชิ้น ซึ่งพบว่าผู้ป่วยที่มี

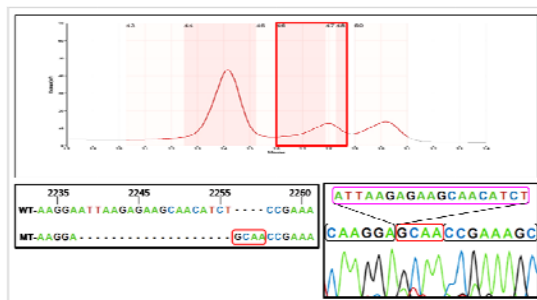


ภาพที่ 2 การเปรียบเทียบโปรตีน EGFR ปกติ กับโปรตีน EGFR ที่มีการกลายพันธุ์แบบ in-frame deletion/insertion กรอบเส้นประแสดงตำแหน่ง LREA motif

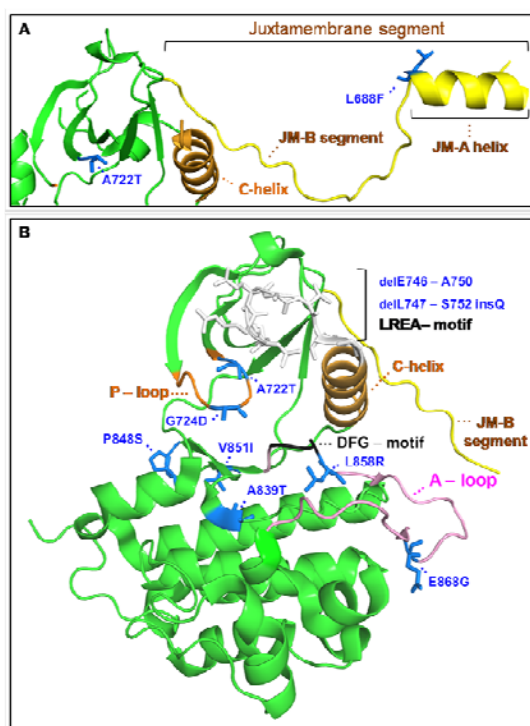
การกลายพันธุ์แบบ V851I ไม่ตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา gefitinib (Cappuzzo *et al.*, 2005; Gow *et al.*, 2008) คาดว่าน่าจะเกิดจากการที่กรดอะมิโนทั้งสองชนิดอยู่ในกลุ่ม hydrophobic เหมือนกันและมีโครงสร้างของ side chain ใกล้เคียงกันโครงสร้างของโปรตีนจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

การกลายพันธุ์ชนิด E868G (c.2603A>G หรือ p.Glu868Gly) พบว่าตำแหน่งที่เกิดการกลายพันธุ์อยู่ในส่วน activation loop (A-loop) ของ tyrosine kinase ที่มีความสำคัญในกระบวนการ phosphorylation โดย Hsieh *et al.*, (2006) ได้รายงานการกลายพันธุ์ชนิดนี้ร่วมกับการกลายพันธุ์ชนิดอื่นในผู้ป่วย 2 ราย ผู้ป่วยรายที่มีพยาธิสภาพแบบ adenocarcinoma ตอบสนองแบบ partial respond แต่ในผู้ป่วยรายที่มีพยาธิสภาพแบบ squamous cell carcinoma กลับพบว่าไม่ตอบสนองต่อการรักษาด้วยยา gefitinib

การกลายพันธุ์ชนิด small deletion หรือ insertion ที่อยู่ในสถานะ heterozygous เมื่อนำไปหาลำดับเบส จะมีการซ้อนกันของ chromatogram ระหว่างอัลลีลปกติกับอัลลีลที่กลายพันธุ์ ทำให้มีความยุ่งยากในการระบุชนิดของการกลายพันธุ์ งานวิจัยนี้จึงแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยใช้เทคนิคการแยกอัลลีลด้วยเครื่อง DHPLC โดยใช้ sizing mode ซึ่งทำให้สามารถแยกอัลลีลที่กลายพันธุ์ออกจากอัลลีลปกติด้วยขนาดที่แตกต่างกันได้ จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่ได้ไปหาลำดับเบส (ภาพที่ 3) ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกและรวดเร็วกว่าการแยกอัลลีลโดยใช้เทคนิค TA cloning เป็นอย่างมาก



ภาพที่ 3 elution profile จากเครื่อง DHPLC ในการทำ fraction collection เพื่อแยกอัลลีลโดยการเก็บ peak ที่ 2 (กรอบสีแดงด้านบน) และผลการหาลำดับเบสที่ได้ (ด้านล่าง)



ภาพที่ 4 ตำแหน่งการกลายพันธุ์ของยีน EGFR บริเวณ tyrosine kinase domain ที่พบในการศึกษาครั้งนี้ รูปโครงสร้างสามมิติและตำแหน่งที่เกิดการกลายพันธุ์แสดงโดยใช้โปรแกรม PyMOL (DeLano Scientific LLC, San Carlos, CA, USA) สร้างจากไฟล์ฐานข้อมูลโครงสร้างโปรตีน (PDB) 3GOP และ 1M17

นอกจากการกลายพันธุ์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในการวิจัยครั้งนี้ยังพบการกลายพันธุ์แบบ missense ซึ่งไม่เคยมีรายงานมาก่อน (novel mutation) อีก 4 ชนิด ได้แก่ การกลายพันธุ์ชนิด L688F (c.2062C>T หรือ p.Leu688Phe) การกลายพันธุ์ดังกล่าวนี้อยู่ที่บริเวณ juxtamembrane segment (ภาพที่ 4A) ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มความเสถียรของโมเลกุลโปรตีน EGFR ที่เข้าคู่กัน

ในขณะที่เกิด dimerization โดยกรดอะมิโน leucine ที่ codon 688 เป็น 1 ใน 3 ของ hydrophobic residues (Leu 688, Val 669, Leu 692) ที่มีความจำเป็นในกระบวนการกระตุ้นให้โปรตีน EGFR อยู่ในสถานะ active (Jura *et al.*, 2009)

การกลายพันธุ์ชนิด A722T (c.2164G>A หรือ p.Ala722Thr) และ G724D (c.2171G>A หรือ p.Gly724Asp) เกิดขึ้นที่บริเวณ ATP-binding motif หรือ P-loop (ภาพที่ 4B) ซึ่งเป็นบริเวณอนุรักษ์ของโปรตีนในกลุ่ม receptor tyrosine kinase มีลำดับกรดอะมิโนแบบ GXGXXG โดย glycine ตัวแรกจะอยู่ที่ codon 719 เช่นเดียวกับที่มีรายงานการกลายพันธุ์แบบ G719X และมีความสัมพันธ์กับการตอบสนองต่อการรักษาด้วยยาในกลุ่ม EGFR-TKIs ด้วย (Pacz *et al.*, 2004)

การกลายพันธุ์แบบสุดท้าย คือ P848S (c.2542G>A หรือ p.Pro848Ser) พบว่าคุณสมบัติของโปรตีนเปลี่ยนจาก hydrophobic เป็น hydrophilic การกลายพันธุ์ดังกล่าวเกิดขึ้นที่บริเวณ catalytic cleft ของ tyrosine kinase ใกล้กับบริเวณ ATP-binding pocket ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ยาในกลุ่ม EGFR-TKIs เช่น gefitinib หรือ erlotinib เข้ามาเกาะเพื่อยับยั้งการทำงานของโปรตีน EGFR การเปลี่ยนคุณสมบัติของโปรตีนดังกล่าวอาจมีผลต่อการตอบสนองการรักษาดด้วยยาในกลุ่ม EGFR-TKIs

ในงานวิจัยครั้งนี้ไม่พบการกลายพันธุ์แบบ G719X และ L861Q ที่พบได้ราวร้อยละ 1-3 (Murray *et al.*, 2008) โดยมีรายงานว่ามีความสัมพันธ์กับการตอบสนองต่อการรักษาดด้วยยาในกลุ่ม EGFR-TKIs ด้วยเหมือนกัน (Mitsudomi and Yatabe, 2007; Lynch *et al.*, 2004) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ยังมีไม่มากพอ หรืออาจมาจากความแตกต่างทางพันธุกรรมของประชากรก็เป็นได้

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ทำให้ทราบอุบัติการณ์การกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* ในกลุ่มผู้ป่วยมะเร็งปอดที่อาศัยในเขตภาคเหนือของไทย ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาความสัมพันธ์ของการกลายพันธุ์ของยีน *EGFR* กับการตอบสนองต่อการรักษาด้วยยาในกลุ่ม *EGFR*-TKIs หรือการพยากรณ์ของโรค

ข้อเสนอแนะ

อุบัติการณ์การกลายพันธุ์ที่ได้จากการศึกษานี้เป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้น ยังคงมีความจำเป็นในอนาคตที่จะต้องศึกษาในตัวอย่างประชากรเพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถใช้เป็นข้อมูลอุบัติการณ์ของประชากรทั่วไปในภาคเหนือของไทยได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วรรณาทอง นพคุณ หน่วยอนุพันธุศาสตร์ สถานส่งเสริมการวิจัย คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดล (อาจารย์ที่ปรึกษา) ที่ให้การสนับสนุน ให้คำชี้แนะในการทำวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ คุณลักขณา เอี่ยมเหล็ง ภาควิชาพยาธิวิทยา คณะแพทยศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดเตรียมตัวอย่างที่นำมาใช้ศึกษาในครั้งนี้ ขอขอบคุณผู้ป่วยมะเร็งปอดทุกท่าน และขอขอบคุณ สาขาวิชาเวชพันธุศาสตร์ ภาควิชาอายุรศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล มหาวิทยาลัยมหิดลที่อนุญาตให้ข้าพเจ้ามาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท

เอกสารอ้างอิง

- Arteaga, C. L. 2002. Epidermal Growth Factor Receptor Dependence in Human Tumors: More Than Just Expression?. *Oncologist*. Vol. 7. Page(s):31-39.
- Bailey, R., Kris, M., Wolf, M., Kay, A., Averbuch, S., Askaa, J., Janas, M., Schmidt, K., and Fukuoka,

- M. 2003. O-242 Gefitinib ('Iressa', ZD1839) Monotherapy for Pretreated Advanced Non-Small-Cell Lung Cancer in IDEAL 1 and 2: Tumor Response is not Clinically Relevantly Predictable from Tumor *EGFR* Membrane Staining Alone. *Lung Cancer*. Vol.41. S71.
- Bamford, S., Dawson, E., Forbes, S., Clements, J., Pettett, R., Dogan, A., Flanagan, A., Teague, J., Futreal, P. A., Stratton, M. R., et al. 2004. The COSMIC (Catalogue of Somatic Mutations in Cancer) database and website. *Br. J. Cancer*. Vol. 91. Page(s):355-358.
- Cancer Unit: Maharaj Nakorn Chiang Mai Hospital 2007. *Chiangmai Cancer Registry 2007* (Chaing Mai, Thailand: Faculty of Medicine, Chaing Mai University).
- Cappuzzo, F., Hirsch, F. R., Rossi, E., Bartolini, S., Ceresoli, G. L., Bemis, L., Haney, J., Witta, S., Danenberg, K., Domenichini, I., et al. 2005. Epidermal Growth Factor Receptor Gene and Protein and Gefitinib Sensitivity in Non-Small-Cell Lung Cancer. *J. Natl. Cancer Inst.* Vol.97. Page(s):643-655.
- Ciardiello, F., and Tortora, G. 2008. *EGFR* antagonists in cancer treatment. *N Engl J Med*. Vol.358. Page(s):1160-1174.
- Cohen, M. H., Johnson, J. R., Chen, Y., Sridhara, R., and Pazdur, R. 2005. FDA Drug Approval Summary: Erlotinib (Tarceva(R)) Tablets. *Oncologist*. Vol.10. Page(s):461-466.
- Cohen, M. H., Williams, G. A., Sridhara, R., Chen, G., and Pazdur, R. 2003. FDA Drug Approval Summary: Gefitinib (ZD1839) (Iressa(R)) Tablets. *Oncologist*. Vol.8. Page(s):303-306.
- Deesomchok, A., Dechayonbancha, N., and Thongprasert, S. 2005. Lung cancer in Maharaj Nakorn Chiang Mai Hospital: comparison of the clinical manifestations between the young and old age groups. *J Med Assoc Thai*. Vol.88. Page(s):1236-1241.

- Fukuoka, M., Yano, S., Giaccone, G., Tamura, T., Nakagawa, K., Douillard, J., Nishiaki, Y., Vansteenkiste, J., Kudoh, S., Rischin, D., et al. 2003. Multi-Institutional Randomized Phase II Trial of Gefitinib for Previously Treated Patients With Advanced Non-Small-Cell Lung Cancer. *J Clin Oncol*. Vol.1 21. Page(s):2237-2246.
- Gow, C., Chien, C., Chang, Y., Chiu, Y., Kuo, S., Shih, J., Chang, Y., Yu, C., Yang, C., and Yang, P. 2008. Radiotherapy in Lung Adenocarcinoma with Brain Metastases: Effects of Activating Epidermal Growth Factor Receptor Mutations on Clinical Response. *Clinical Cancer Research*. Vol.14. Page(s):162-168.
- Hsieh, M., Fang, Y., Chang, W., Kuo, H., Lin, S., Liu, H., Liu, C., Chen, H., Ku, Y., Chen, Y., et al. 2006. Complex mutation patterns of epidermal growth factor receptor gene associated with variable responses to gefitinib treatment in patients with non-small cell lung cancer. *Lung Cancer*. Vol.53. Page(s):311-322.
- Huang, S., Liu, H., Li, L., Ku, Y., Fu, Y., Tsai, H., Chen, Y., Lin, Y., Chang, W., Kuo, H., et al. 2004. High Frequency of Epidermal Growth Factor Receptor Mutations with Complex Patterns in Non-Small Cell Lung Cancers Related to Gefitinib Responsiveness in Taiwan". *Clin Cancer Res*. Vol.10. Page(s):8195-8203.
- Hynes, N. E., and Lane, H. A. 2005. ERBB receptors and cancer: the complexity of targeted inhibitors. *Nat Rev Cancer*. Vol.5. Page(s):341-354.
- Jura, N., Endres, N. F., Engel, K., Deindl, S., Das, R., Lamers, M. H., Wemmer, D. E., Zhang, X., and Kuriyan, J. 2009. Mechanism for Activation of the EGF Receptor Catalytic Domain by the Juxtamembrane Segment. *Cell* 137, 1293-1307.
- Khuahaprema, T., Srivatanakul, P., Sriplung, H., Wiangnon, S., and Sumitsawan, Y. eds. 2007. *Cancer in Thailand Vol. IV, 1998-2000*. (Bangkok: Bangkok Medical Publisher).
- Kosaka, T., Yatabe, Y., Endoh, H., Kuwano, H., Takahashi, T., and Mitsudomi, T. 2004. Mutations of the Epidermal Growth Factor Receptor Gene in Lung Cancer: Biological and Clinical Implications. *Cancer Res*. Vol.64. Page(s):8919-8923.
- Kris, M. G., Natale, R. B., Herbst, R. S., Lynch, T. J., Prager, D., Belani, C. P., Schiller, J. H., Kelly, K., Spiridonidis, H., Sandler, A., et al. 2003. Efficacy of Gefitinib, an Inhibitor of the Epidermal Growth Factor Receptor Tyrosine Kinase, in Symptomatic Patients With Non-Small Cell Lung Cancer: A Randomized Trial. *JAMA*. Vol.290. Page(s):2149-2158.
- Lynch, T. J., Bell, D. W., Sordella, R., Gurubhagavatula, S., Okimoto, R. A., Brannigan, B. W., Harris, P. L., Haserlat, S. M., Supko, J. G., Haluska, F. G., et al. 2004. Activating Mutations in the Epidermal Growth Factor Receptor Underlying Responsiveness of Non-Small-Cell Lung Cancer to Gefitinib. *N Engl J Med*. Vol.350. Page(s):2129-219.
- Mitsudomi, T., and Yatabe, Y. 2007. Mutations of the epidermal growth factor receptor gene and related genes as determinants of epidermal growth factor receptor tyrosine kinase inhibitors sensitivity in lung cancer. *Cancer Sci*. Vol.98. Page(s): 1817-24.
- Mok, T. S., Wu, Y., Thongprasert, S., Yang, C., Chu, D., Saijo, N., Sunpawaravong, P., Han, B., Margono, B., Ichinose, Y., et al. 2009. Gefitinib or Carboplatin-Paclitaxel in Pulmonary Adenocarcinoma. *N Engl J Med*, NEJMoa0810699.
- Murray, S., Dahabreh, I. J., Linardou, H., Manoloukos, M., Bafaloukos, D., and Kosmidis, P. 2008. Somatic mutations of the tyrosine kinase domain of epidermal growth factor receptor and tyrosine kinase inhibitor response to TKIs in non-small cell lung cancer: an analytical database. *J Thorac*

- Oncol. Vol.3. Page(s):832-839.
- Okami, J., Taniguchi, K., Higashiyama, M., Maeda, J., Oda, K., Orita, N., Koizumi, K., Kodama, K., and Kato, K. 2007. Prognostic factors for gefitinib-treated postoperative recurrence in non-small cell lung cancer. *Oncology*. Vol.72. Page(s): 234-242.
- Paez, J. G., Janne, P. A., Lee, J. C., Tracy, S., Greulich, H., Gabriel, S., Herman, P., Kaye, F. J., Lindeman, N., Boggon, T. J., et al. 2004. EGFR Mutations in Lung Cancer: Correlation with Clinical Response to Gefitinib Therapy. *Science*. Vol.304. Page(s):1497-1500.
- Pao, W., Miller, V., Zakowski, M., Doherty, J., Politi, K., Sarkaria, I., Singh, B., Heelan, R., Rusch, V., Fulton, L., et al. 2004. EGF receptor gene mutations are common in lung cancers from "never smokers" and are associated with sensitivity of tumors to gefitinib and erlotinib. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* Vol.101. Page(s): 13306-13311.
- Reiter, J. L., Threadgill, D. W., Eley, G. D., Strunk, K. E., Danielsen, A. J., Colleen Schehl Sinclair, Pearsall, R. S., Green, P. J., Yee, D., Lampland, A. L., et al. 2001. Comparative Genomic Sequence Analysis and Isolation of Human and Mouse Alternative EGFR Transcripts Encoding Truncated Receptor Isoforms. *Genomics*. Vol.71. Page(s):1-20.
- Sakurada, A., Shepherd, F., and Tsao, M. 2006. Epidermal Growth Factor Receptor Tyrosine Kinase Inhibitors in Lung Cancer: Impact of Primary or Secondary Mutations. *Clinical Lung Cancer* . Vol.7. Page(s):S138-S144.
- Sharma, S. V., and Settleman, J. 2009. ErbBs in lung cancer. *Experimental Cell Research*. Vol.315. Page(s): 557-571.
- Shepherd, F. A., Rodrigues Pereira, J., Ciuleanu, T., Tan, E. H., Hirsh, V., Thongprasert, S., Campos, D., Maoleekoonpiroj, S., Smylie, M., Martins, R., et al. 2005. Erlotinib in Previously Treated Non-Small-Cell Lung Cancer. *N Engl J Med*. Vol.353. Page(s):123-132.
- Shi, S., Datar, R., Liu, C., Wu, L., Zhang, Z., Cote, R. J., and Taylor, C. R. 2004. DNA extraction from archival formalin-fixed, paraffin-embedded tissues: heat-induced retrieval in alkaline solution. *Histochemistry and Cell Biology*. Vol.122. Page(s): 211-218.
- Shigematsu, H., Lin, L., Takahashi, T., Nomura, M., Suzuki, M., Wistuba, I. I., Fong, K. M., Lee, H., Toyooka, S., Shimizu, N., et al. 2005. Clinical and Biological Features Associated With Epidermal Growth Factor Receptor Gene Mutations in Lung Cancers. *J. Natl. Cancer Inst.* Vol.97. Page(s):339-346.
- Sriuranpong, V., Chantranuwat, C., Huapai, N., Chalermchai, T., Leungtaeeboon, K., Lertsanguansinchai, P., Voravud, N., and Mutirangura, A. 2006. High frequency of mutation of epidermal growth factor receptor in lung adenocarcinoma in Thailand. *Cancer Letters*. Vol.239. Page(s):292-297.
- Toschi, L., and Cappuzzo, F. 2007. Understanding the New Genetics of Responsiveness to Epidermal Growth Factor Receptor Tyrosine Kinase Inhibitors. *Oncologist*. Vol.12. Page(s):211-220.
- Wiwantikit, V. 2006. Squamous Cell Carcinoma of the Lung: Pattern of Epidermal Growth Factor Receptor Mutation Distribution in Different Populations: A Summary. *Lung*. Vol.184. Page(s):301-302.
- Yamamoto, H., Toyooka, S., and Mitsudomi, T. 2009. Impact of EGFR mutation analysis in non-small cell lung cancer. *Lung Cancer*. Vol.63. Page(s): 315-321.