



การประเมินคุณภาพทางคลินิกของภาพหลอดเลือดจากการลดปริมาณรังสีในหัตถการรังสีร่วมรักษาทางระบบประสาทในสถาบันประสาทวิทยา

พิไลพร จัตราธิกุล วท.บ

สถาบันประสาทวิทยา แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400

Abstract: Evaluation of Clinical Image Quality Following Radiation Dose Reduction in Procedures of Interventional Neuroradiology in Prasat Neurological Institute

Pilaiporn Chattrathikul, B.Sc.

Prasat Neurological Institute, Thung Phayathai, Ratchathewi, Bangkok, 10400

(Email: plprnch@gmail.com)

(Received: August 1, 2019; Revised: August 22, 2019; Accepted: May 29, 2020)

Background: Treatment of patients with complex diseases by interventional neuroradiology procedures have taken long time, which causes patients to receive high radiation dose. **Objective:** To compare radiation dose to patients between care dose protocol of the factory and dose reduction protocol of Prasat Neurological Institute in Thailand and also evaluate the quality of vascular images following radiation dose reduction protocol. **Method:** The acquisition care dose protocol of the digital subtraction angiography was reduced from 1.8 $\mu\text{Gy}/\text{frame}$ to low dose protocol 1.2 $\mu\text{Gy}/\text{frame}$. A retrospective study of 16 patients with interventional neuroradiology procedures were conducted by selecting patients who were treated with two sessions using care dose and low dose protocols. The image quality assessment from 2 tests in term of clinical diagnosis were performed by 2 radiologists. **Result:** The clinical image quality between care dose and low dose protocols in arterial phase, capillary phase, venous phase and over all image were not statistically significant. While the kerma air product (KAP) dose in the same vascular examination decreased by 26.5% and reference air kerma (K_a, r) decreased by 31.2%. When combining radiation dose in a single procedure, peak skin dose decreased by 31.99%, KAP decreased by 35.3%, reference air kerma decreased by 27.5%. **Conclusion:** Low dose protocol can be used both in interventional neuroradiology procedure and cerebral angiography, allow patient to receive minimal radiation, also reduce risk of radiation complication, and still maintain quality of vascular images for diagnostic and serve treatment target.

Keywords: Interventional Neuroradiology, Digital subtraction angiography, Radiation dose reduction

บทคัดย่อ

ภูมิหลัง: การรักษาผู้ป่วยด้วยหัตถการรังสีร่วมรักษาทางระบบประสาท ในผู้ป่วยที่เป็นโรคซับซ้อน ใช้เวลาการรักษานาน ทำให้ผู้ป่วยรับปริมาณรังสีสูง **วัตถุประสงค์:** เพื่อเปรียบเทียบปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับ ระหว่างโปรโตคอลลดปริมาณรังสีจากโรงงานและโปรโตคอลลดปริมาณรังสีของสถาบันประสาทวิทยา อีกทั้งประเมินคุณภาพของโปรโตคอลลดปริมาณรังสีในการวินิจฉัยภาพหลอดเลือดสมอง **วิธีการ:** ลดค่าปริมาณรังสีการบันทึกภาพ (acquisition) ของเครื่อง digital subtraction angiography จากโปรโตคอล care dose ของโรงงาน 1.8 $\mu\text{Gy}/\text{frame}$ เป็นโปรโตคอลปริมาณรังสีต่ำ (low dose) 1.2 $\mu\text{Gy}/\text{frame}$ ศึกษา

ย้อนหลังในผู้ป่วยรังสีร่วมรักษาทางระบบประสาทจำนวน 16 ราย ที่รับการรักษาด้วยหัตถการรังสีร่วมรักษา 2 ครั้ง โดยใช้โปรโตคอล care dose และ low dose รังสีแพทย์ 2 คน ประเมินคุณภาพหลอดเลือดเดียวกันจากการตรวจ 2 ครั้ง **ผล:** คุณภาพของภาพหลอดเลือดจากโปรโตคอล care dose และ low dose ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งในหลอดเลือดแดง หลอดเลือดฝอย หลอดเลือดดำ และภาพรวมทั้งหมด ในขณะที่ปริมาณรังสี kerma air product (KAP) ในการตรวจหลอดเลือดเดียวกันลดลงร้อยละ 26.5 และ reference air kerma (K_a, r) ลดลงร้อยละ 31.2 เมื่อรวมปริมาณรังสีในการตรวจหนึ่งครั้ง ปริมาณรังสี peak skin dose (PSD) ลดลงร้อยละ 31.99 ค่า KAP ลดลงร้อยละ 35.3 ค่า K_a, r

ลดลงร้อยละ 27.5 **สรุป:** โปรโตคอลปริมาณรังสีต่ำนี้สามารถนำมาใช้ในหัตถการรังสีร่วมรักษาระบบประสาทและการตรวจหลอดเลือดสมองเพื่อให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีน้อยที่สุด ลดความเสี่ยงจากผลแทรกซ้อนของรังสีและยังคงรักษาคุณภาพของภาพหลอดเลือดสำหรับการวินิจฉัย สามารถรักษาโรคได้ตามเป้าหมาย

คำสำคัญ: รังสีร่วมรักษาทางระบบประสาท เครื่องเอกซเรย์หลอดเลือด การลดปริมาณรังสี

บทนำ

รังสีร่วมรักษาทางระบบประสาท คือการใช้เครื่องเอกซเรย์ดูภาพรังสีบีนจอ (fluoroscopy) และบันทึกภาพรังสี เพื่อวินิจฉัยและรักษาโรคระบบประสาท แพทย์รังสีร่วมรักษาใช้สายสวนหลอดเลือดนำวัสดุเล็กๆ ผ่านเข้าหลอดเลือดแดงหรือหลอดเลือดดำ เพื่อรักษาโรคหลอดเลือดผิดปกติในสมองและไขสันหลัง เช่น โรคหลอดเลือดแดงและหลอดเลือดดำเชื่อมกันผิดปกติ (dural arteriovenous fistula and arteriovenous malformation) โรคหลอดเลือดแดงและหลอดเลือดดำบริเวณฐานกะโหลก (carotid-cavernous sinus fistula) โรคหลอดเลือดสมองโป่งพอง (aneurysm) โรคหลอดเลือดสมองตีบตันเฉียบพลัน (acute ischemic stroke) ปัจจุบันในประเทศไทย การรักษาด้วยวิธีรังสีรักษาทางระบบประสาทเริ่มมีบทบาทสำคัญในการรักษาความผิดปกติของโรคหลอดเลือดสมองและหลอดเลือดไขสันหลัง โดยการใช้เครื่องเอกซเรย์หลอดเลือด (digital subtraction angiography) ดูภาพสายสวนหลอดเลือดและใส่วัสดุอุดหรือขยายหลอดเลือด รวมทั้งบันทึกภาพรังสีหลอดเลือด การรักษาโรคที่มีรอยโรคซับซ้อนซึ่งต้องใช้เวลาการดูภาพและการบันทึกภาพรังสีจำนวนมาก ทำให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีสูง

หน่วยวัดปริมาณรังสีที่นิยมใช้สำหรับเปรียบเทียบมาตรฐานเพื่อประเมินค่าความเสี่ยงต่อรังสีสำหรับเครื่องเอกซเรย์หลอดเลือด (DSA) คือ kerma area product (KAP) และ peak skin dose (PSD) ซึ่งเป็นหน่วยวัดปริมาณรังสีที่มีรายงานในเครื่องเอกซเรย์หลอดเลือดสมัยใหม่ kerma area product คือ ปริมาณรังสีที่ออกจากหลอดเลือดเอกซเรย์ (Gy) ในหน่วยพื้นที่ (cm^2) มีหน่วยเป็น $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ ค่า KAP สามารถนำไปคำนวณปริมาณรังสีที่อวัยวะต่างๆ (organ dose) คำนวณปริมาณรังสียั่งผล (effective dose) และมีความสัมพันธ์กับโอกาสการเกิดมะเร็ง (stochastic effect) peak skin dose คือปริมาณรังสีสูงสุดที่ผิวหนังได้รับการตรวจหนึ่งครั้ง มีหน่วยเป็น Gy ค่า PSD มีความสัมพันธ์กับอาการบาดเจ็บทางผิวหนัง (skin injury) ที่เกิดจากรังสี¹ นอกจากนี้มีงานวิจัยบางฉบับ^{2,3} เปรียบเทียบค่าปริมาณรังสี reference air kerma (Ka_r) หรือ cumulative dose (CD) หมายถึง ปริมาณรังสีที่จุดอ้างอิงคือจุดที่ต่ำกว่า isocenter ของ C-arm 15 เซนติเมตร⁴ ปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับจากหัตถการรังสีร่วมรักษาระบบประสาทมีค่าสูงกว่าการตรวจวินิจฉัยหลอดเลือด (cerebral angiography)^{5,6} การรักษาความผิดปกติของหลอดเลือดสมองด้วยการอุดหลอดเลือด (embolization) ในโรค brain AVM, AVF ทำให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีสูงสุดที่ผิวหนัง

(PSD) มากเป็น 3.5 เท่าของหัตถการรังสีร่วมรักษาในโรคอื่นๆ⁷ จากการศึกษาปริมาณรังสีในหัตถการรังสีร่วมรักษาทางระบบประสาทพบว่าค่า PSD ของการรักษาโรค brain AVM มีค่าสูงที่สุดถึง 6.6 Gy และมีผู้ป่วยบางรายได้รับปริมาณรังสี PSD มากกว่า 5 Gy⁸ ซึ่งเป็นปริมาณรังสีที่อาจทำให้เกิดอาการบาดเจ็บที่ผิวหนัง (skin injuries) ปริมาณรังสีที่ได้รับในครั้งเดียวในเวลาสั้นๆ 2-5 Gy ทำให้เกิดผิวหนังบวมแดงในระยะ 24 ชั่วโมง และเกิดผื่นวงภายใน 2-8 สัปดาห์⁹ คณะกรรมการความปลอดภัยและสุขภาพ สมาคมรังสีร่วมรักษาของสหรัฐอเมริกา (The Society of Interventional Radiology Safety and Health Committee) กำหนดค่าปริมาณรังสีที่ต้องเฝ้าระวัง (first notification) ได้แก่ ค่า PSD สูงกว่า 2,000 mGy และเมื่อค่า PSD สูงกว่า 3,000 mGy ต้องติดตามอาการผู้ป่วย (follow up)¹⁰ เครื่อง DSA จะมีโปรโตคอลการตรวจมาตรฐาน (standard) และโปรแกรมลดปริมาณรังสี (care dose) สถาบันประสาทวิทยาได้ใช้โปรโตคอล care dose พบว่าในการรักษาผู้ป่วยรังสีร่วมรักษาบางรายที่เป็นโรคซับซ้อน หัตถการใช้เวลานาน ทำให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีสูงถึงค่าที่ต้องเฝ้าระวัง นอกจากนี้งานวิจัยบางฉบับได้ศึกษาการลดปริมาณรังสีของเครื่อง DSA จากค่าโรงงาน¹¹⁻¹³ ทางสถาบันฯ จึงได้ปรับเปลี่ยนเป็นโปรโตคอลปริมาณรังสีต่ำ (low dose) งานวิจัยนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อต้องการประเมินคุณภาพของโปรโตคอล low dose เปรียบเทียบกับโปรโตคอล care dose ด้านคุณภาพในการวินิจฉัยทางคลินิกของแพทย์

วัตถุประสงค์และวิธีการ

การวิจัยเป็นการศึกษาเชิงพรรณนาย้อนหลัง (retrospective descriptive study) ในผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาด้วยวิธีรังสีร่วมรักษาทางระบบประสาท (interventional neuroradiology) ในสถาบันประสาทวิทยา ช่วงเวลาดังตั้งเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 โดยใช้เครื่องเอกซเรย์หลอดเลือดสองระนาบ (digital subtraction angiography) ยี่ห้อ Siemens รุ่น Artis Q ผลิตจากเมือง Forchhiem ประเทศเยอรมนี

โปรโตคอลการตรวจ ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2560 หัตถการรังสีร่วมรักษาในสถาบันประสาทวิทยาใช้โปรโตคอล care dose จากโรงงาน ค่าปริมาณรังสีการบันทึกภาพ (acquisition) 1.8 $\mu\text{Gy}/\text{frame}$ การบันทึกภาพรังสีแบ่งเป็น 2 ช่วง (phase) ช่วงที่ 1 อัตราเร็ว 4 ภาพต่อวินาที ใช้เวลา 5 วินาที ช่วงที่ 2 อัตราเร็ว 1 ภาพต่อวินาที ใช้เวลา 24 วินาที การดูภาพรังสี (fluoroscopy) ใช้เทคนิค pulse fluoroscopy ปริมาณรังสี 55 nGy/ frame อัตราเร็ว 7.5 ภาพต่อวินาที (frame/ sec) เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 ได้ปรับปรุงเป็นโปรโตคอลปริมาณรังสีต่ำ (low dose) โดยลดปริมาณรังสีการบันทึกภาพเป็น 1.2 $\mu\text{Gy}/\text{frame}$ ลดปริมาณรังสี fluoroscopy เป็น 45 nGy/ frame และลดจำนวนภาพโดยลดเวลาการบันทึกภาพช่วงที่ 1 เป็น 4 วินาที ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบตัวแปรที่แตกต่างกันของโปรโตคอล care dose และโปรโตคอล low dose

ตัวแปรอื่นๆ ที่ใช้ค่าคงเดิม ได้แก่ ขนาดของ focal spot 0.4 มิลลิเมตร การกรองรังสี (filtration) ใช้ copper 0.1 ถึง 0.3 มม. เครื่อง DSA ใช้ระบบตั้งค่าปริมาณรังสีอัตโนมัติ (automatic exposure control) ที่ติดตั้งในเครื่องเอกซเรย์หลอดเลือด

โปรโตคอล low dose นี้ได้รับการปรับค่าตัวแปรที่เกี่ยวกับภาพรังสีใหม่ให้เหมาะสม เช่น window width, window center, brightness, contrast ภายใต้การกำกับดูแลโดยผู้เชี่ยวชาญของบริษัทซีเมนส์ ประเทศไทย จำกัด

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบตัวแปรของโปรโตคอล care dose จากโรงงานและโปรโตคอลปริมาณรังสีต่ำ (low dose)

ตัวแปร	โปรโตคอล care dose	โปรโตคอล low dose
ปริมาณรังสีในการบันทึกภาพ (acquisition)	1.8 µGy/ frame	1.2 µGy/ frame
ปริมาณรังสีในการดูภาพบนจอ (fluoroscopy)	55 nGy/ frame	45 nGy/ frame
อัตราเร็วในการบันทึกภาพ	phase I 4 f/s 5sec phase II 1 f/s 24sec	phase I 4 f/ s 4sec phase II 1 f/ s 24sec

ในการวิจัยนี้เลือกผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาผ่านหลอดเลือดโดยวิธีอุดกั้นหลอดเลือดที่ผิดปกติ (endovascular embolization) ที่ได้รับการรักษา 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ในช่วงเวลาที่ใช้โปรโตคอล care dose และครั้งที่ 2 ในช่วงเวลาที่ใช้โปรโตคอล low dose จำนวนผู้ป่วยทั้งหมด 16 ราย การกำหนดจำนวนผู้ป่วยในการศึกษาครั้งนี้คำนวณมาจากการศึกษาการลดปริมาณรังสีในหัตถการตรวจ

หลอดเลือดสมองโดย Honarmand¹¹ ซึ่งได้ทำการศึกษการตรวจ cerebral angiogram ด้วยเครื่อง DSA ในผู้ป่วย 10 ราย โดยมีการเปรียบเทียบปริมาณรังสีและ มีการประเมินภาพหลอดเลือดในผู้ป่วยคนเดียวกัน จากการนำผลการศึกษาของ Honarmand¹¹ โดยนำค่าปริมาณรังสีเฉลี่ย (mean air kerma) มาคำนวณได้จำนวนกลุ่มตัวอย่าง ดังนี้

Mean reference air kerma

$Z_{\alpha/2}$	Z_β	n_1	n_2	$\bar{X}_1$	$\bar{X}_2$	S_1	S_2	σ^2	n/group
1.96	1.28	10	10	72.97	28.25	47.59	21.06	1,354.17	14.22

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร } n/\text{group} &= \frac{[2(Z_{\alpha/2} + Z_\beta)^2 \sigma^2]}{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)^2} \\
 \text{โดยที่ } \sigma^2 &= \text{Pool variance} \\
 &= \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \\
 \text{แทนค่า } \sigma^2 &= \frac{(10 - 1)(47.59)^2 + (10 - 1)(21.06)^2}{10 + 10 - 2} \\
 &= 1,354.17 \\
 \text{จากสูตร } n/\text{group} &= \frac{[2(Z_{\alpha/2} + Z_\beta)^2 \sigma^2]}{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)^2} \\
 &= \frac{[2(1.96 + 1.28)^2 - (1,354.17)]}{(72.97 - 28.25)^2} \\
 &= 14.22 \\
 &= 15.00
 \end{aligned}$$

ดังนั้น จะต้องศึกษากลุ่มละ 15 คน

ผู้ป่วยทุกรายในการศึกษานี้ได้รับการรักษาโดยแพทย์รังสีร่วมรักษาคนเดียวกัน โดยมีรังสีแพทย์ผู้ช่วย 1 คน การเลือกหลอดเลือดที่นำมาเปรียบเทียบ ผู้วิจัยเลือกภาพหลอดเลือดเดียวกัน

จากการรักษา 2 ครั้ง ที่มีระยะเวลาการถ่ายภาพ (acquisition time) ใกล้เคียงกัน

วิธีการรักษา การตรวจหลอดเลือดใช้เทคนิค selective angiography โดยใช้สายสวนหลอดเลือดผ่านหลอดเลือด femoral ที่ขาหนีบ แล้วสอดสายสวนหลอดเลือดไปยังหลอดเลือดสมอง เพื่อตรวจวินิจฉัยและรักษาความผิดปกติของหลอดเลือดด้วยการใช้วัสดุอุดหลอดเลือด ได้แก่ Cyanoacrylate glue (Histoacryl; B.Braun, Melsungen, Germany), non-adhesive liquid embolic agent (Onyx ; Covidien, Irvine, CA, USA), PHIL; Microvention, Tustin, California USA) และ balloon(Balt, Montmorency, France) สารทึบรังสีที่ใช้คือ Hexabrix 320 (Guerbet,Anlnay-sous-Bois, France) แพทย์รังสีร่วมรักษาและรังสีแพทย์ผู้ช่วยใช้มือฉีดสารทึบรังสี (manual injection) และควบคุมการถ่ายภาพหลอดเลือดเองโดยการใช้สวิทช์ควบคุมด้วยเท้า (foot switch)

การประเมินหลอดเลือดทางคลินิก รังสีแพทย์ 2 คน ประเมินคุณภาพของหลอดเลือดจากหัตถการรังสีร่วมรักษาทั้ง 2 ครั้ง โดยการประเมินคุณภาพใช้จรรยาบรรณมาตรฐานสำหรับการวินิจฉัยของรังสีแพทย์ที่มีความละเอียด (resolution) ของจอภาพ 6 ล้านพิกเซล ขั้นตอนการประเมินคุณภาพ รังสีแพทย์เปิดภาพหลอดเลือดจากหัตถการครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 เปรียบเทียบกันบนจอภาพที่แบ่งเป็น 2 ภาพ ซ้ายและขวา ในระนาบ frontal และระนาบ lateral ตามลำดับ รังสีแพทย์ประเมินคุณภาพหลอดเลือดในแต่ละ phase ได้แก่ arterial phase, capillary phase, venous phase และในภาพรวม คุณลักษณะของหลอดเลือดในแต่ละ phase ใช้เกณฑ์คุณลักษณะของ Soderman¹⁴ ได้แก่ ระยะ arterial phase ประเมินความชัดเจนของหลอดเลือดแดงใหญ่และเล็ก การมองเห็นหลอดเลือดเชื่อมต่อ (crossing arteries) ระยะ capillary phase ดูการกระจายตัวของแขนงหลอดเลือดฝอย ระยะ venous phase ประเมินความคมชัดของหลอดเลือดดำและแขนงที่สำคัญของหลอดเลือดดำ การประเมินคุณภาพใช้เกณฑ์ 5 คะแนน¹¹ ดังนี้ 5 คะแนน (ดีมาก) เมื่อหลอดเลือดขนาดใหญ่และหลอดเลือดขนาดเล็กชัดเจน 4 คะแนน (ดี) เมื่อหลอดเลือดขนาดใหญ่ชัดเจนและหลอดเลือดขนาดเล็กมองเห็นพอใช้ 3 คะแนน (ปานกลาง) เมื่อภาพหลอดเลือดใช้วินิจฉัยได้แต่มองไม่เห็นหลอดเลือดขนาดเล็กส่วนปลาย 2 คะแนน (ต่ำ) เมื่อหลอดเลือดขนาดใหญ่พอมองเห็นและหลอดเลือด

หลอดเลือดเล็กไม่ชัดเจน 1 คะแนน (ต่ำมาก) เมื่อภาพหลอดเลือดไม่สามารถใช้วินิจฉัยได้

การบันทึกข้อมูลปริมาณรังสี บันทึกข้อมูลตัวแปรต่างๆ และข้อมูลปริมาณรังสี จากรายงานอัตโนมัติ (exam protocol) ของเครื่องเอกซเรย์หลอดเลือดที่จัดเก็บในระบบจัดเก็บภาพรังสี (PACS) ข้อมูลปริมาณรังสีได้มาจากอุปกรณ์วัดรังสีที่ติดตั้งมาในเครื่องเอกซเรย์ รายงานแสดงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการบันทึกภาพรังสีในแต่ละครั้ง ได้แก่ kVp, mA, pulse width (msec), acquisition time, จำนวนภาพ(frame), kerma area product ($\mu\text{Gy}.\text{m}^2$), reference air kerma (mGy) และรายงานสรุปหัตถการ ได้แก่ จำนวนครั้งการบันทึกภาพ (series), จำนวนภาพ, ระยะเวลา fluoroscopy, peak skin dose (mGy), kerma area product ($\mu\text{Gy}.\text{m}^2$), reference air kerma (mGy)

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม SPSS version 16.0 โดยใช้สถิติพรรณนา ได้แก่ จำนวน ร้อยละ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน มัธยฐาน และ interquartile range (IQR), และทดสอบความแตกต่างระหว่าง 2 กลุ่มด้วย Wilcoxon signed-rank test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

ผล

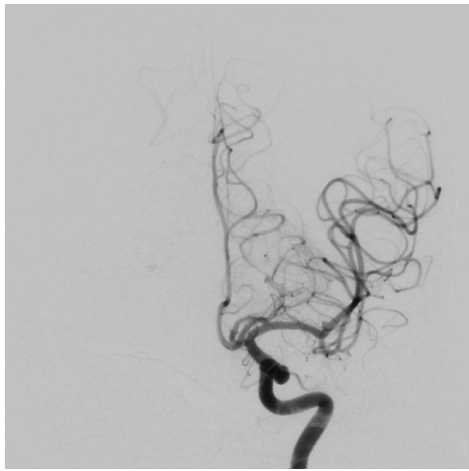
จากการเก็บข้อมูลการรักษาผู้ป่วย ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2560 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2561 มีจำนวนผู้ป่วยที่ตรวจทั้งโปรโตคอล care dose และ low dose ทั้งสิ้นจำนวน 16 ราย เพศชาย 13 ราย เพศหญิง 3 ราย อายุเฉลี่ย 45 ± 14 ปี เป็นผู้ป่วยโรค brain arteriovenous malformation (brain AVM) จำนวน 9 ราย รักษาด้วย glue (N-butyl cyanoacrylate) ทั้งสองครั้ง จำนวน 5 ราย และรักษาด้วย glue ในครั้งที่ 1 และ liquid embolic agent (onyx) ในครั้งที่ 2 จำนวน 4 ราย ผู้ป่วยโรค dural arteriovenous malformation (dural AVM) จำนวน 6 ราย รักษาด้วย glue ในครั้งที่ 1 และ liquid embolic agent (Onyx และ Phil) ในครั้งที่ 2 จำนวน 2 ราย และรักษาด้วย liquid embolic agent ทั้งสองครั้ง จำนวน 4 ราย ผู้ป่วยโรค carotid cavernous fistula (CCF) รักษาด้วย detachable balloon ทั้งสองครั้งจำนวน 1 ราย (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 วิธีการรักษาในผู้ป่วยโปรโตคอล care dose และ low dose

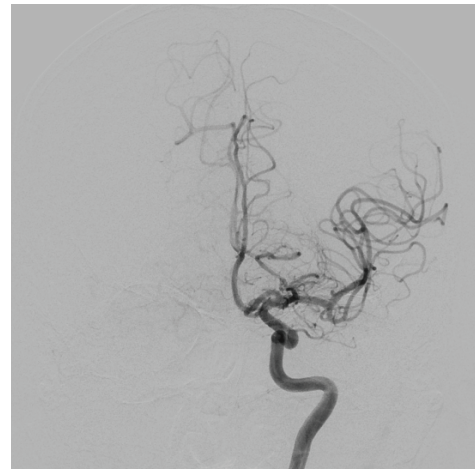
Diagnosis	Procedure care dose/ low dose				รวม
	Glue/ Glue	Glue/ LEA	LEA/ LEA	Balloon/ Balloon	
Brain AVM	5 (31.25%)	4 (25%)	-	-	9 (56.25%)
Dural AVM	-	2 (12.5%)	4 (25%)	-	6 (37.5%)
CCF	-	-	-	1 (6.25%)	1 (6.25%)
รวม	5 (31.25%)	6 (37.5%)	4 (25%)	1 (6.25%)	16 (100%)

หลอดเลือดที่เปรียบเทียบได้แก่ left internal carotid จำนวน 8 ราย right internal carotid จำนวน 4 ราย left vertebral จำนวน 3 ราย และ right vertebral จำนวน 1 ราย ตัวอย่างภาพ

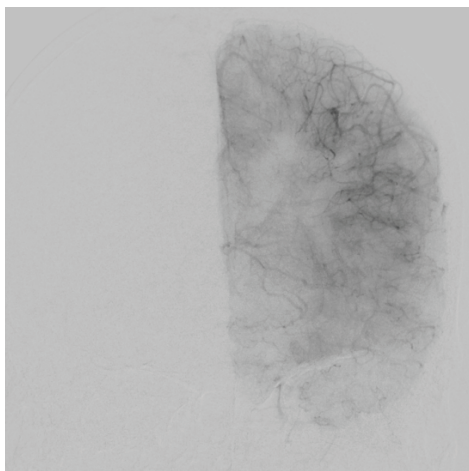
หลอดเลือดจากโปรโตคอล care dose เปรียบเทียบกับภาพหลอดเลือดจากโปรโตคอล low dose (ภาพที่ 1-6)



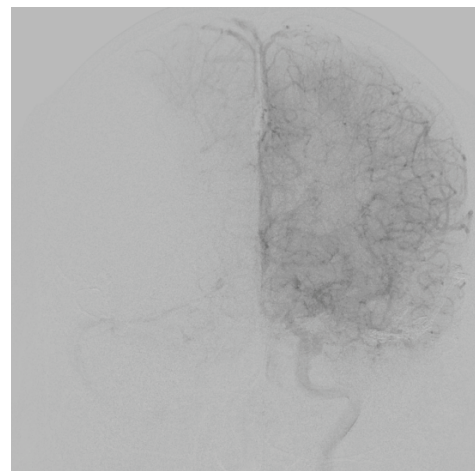
รูปที่ 1ก.



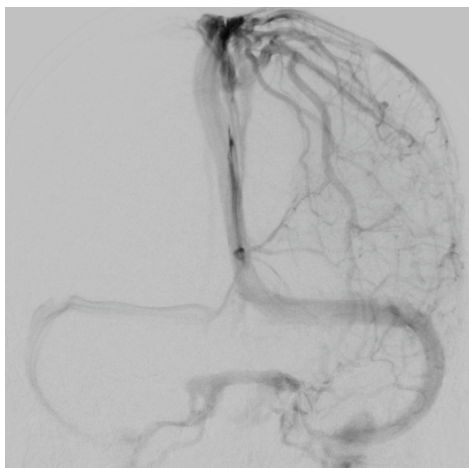
รูปที่ 1ข.



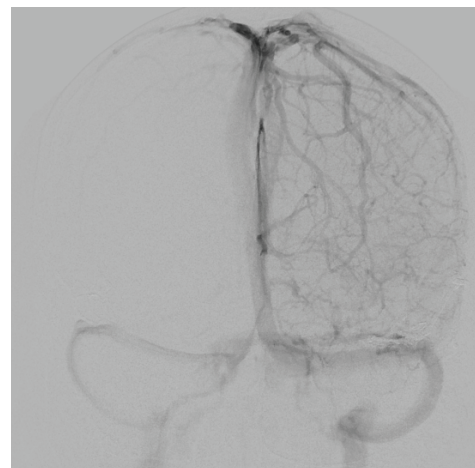
รูปที่ 2ก.



รูปที่ 2ข.

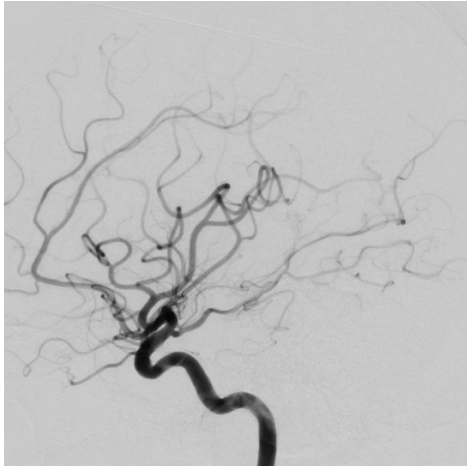


รูปที่ 3ก.

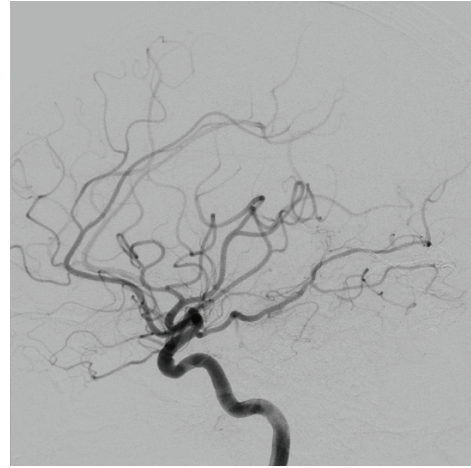


รูปที่ 3ข.

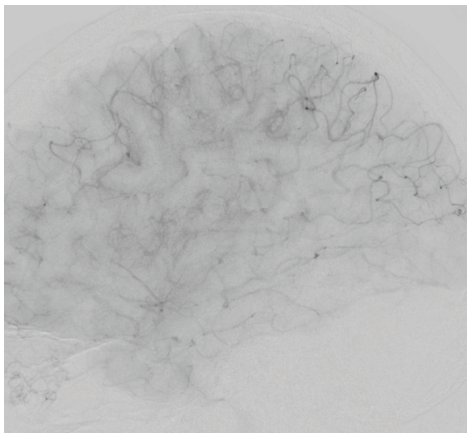
รูปที่ 1-3 หลอดเลือด left internal carotid ระนาบ frontal (ด้านหน้า)
รูปที่ 1 หลอดเลือด arterial phase รูปที่ 2 หลอดเลือด capillary phase รูปที่ 3 หลอดเลือด venous phase
รูปด้านซ้าย (ก) จากโปรโตคอล care dose รูปด้านซ้าย (ข) จากโปรโตคอล low dose



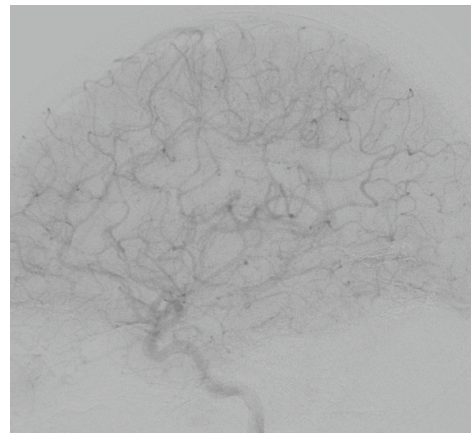
รูปที่ 4ก.



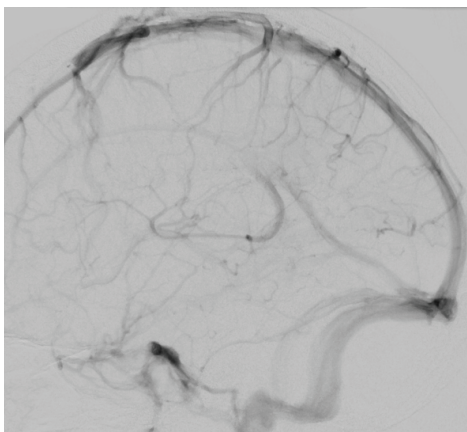
รูปที่ 4ข.



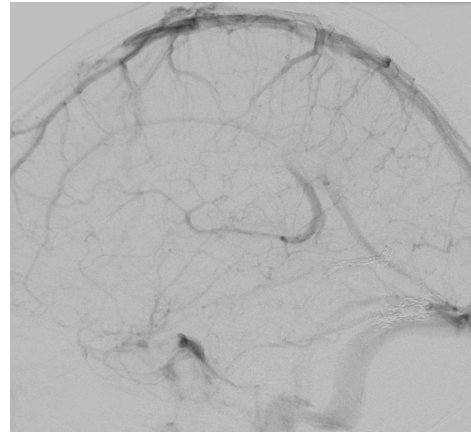
รูปที่ 5ก.



รูปที่ 5ข.



รูปที่ 6ก.



รูปที่ 6ข.

รูปที่ 4-6 หลอดเลือด left internal carotid ระนาบ lateral (ด้านข้าง)

รูปที่ 4 หลอดเลือด arterial phase รูปที่ 5 หลอดเลือด capillary phase รูปที่ 6 หลอดเลือด venous phase

รูปด้านซ้าย (ก) จากโปรโตคอล care dose รูปด้านซ้าย (ข) จากโปรโตคอล low dose

ผลการประเมินคุณภาพของภาพหลอดเลือดของรังสีแพทย์ 2 คนตามเกณฑ์ที่กำหนด แสดงในตารางที่ 3 คะแนนเฉลี่ยของ care dose สูงกว่า low dose 0.1 คะแนนใน arterial phase และ venous phase ส่วนใน capillary phase และ over all (ภาพรวม) มีค่าเฉลี่ยเท่ากัน และเมื่อทดสอบความแตกต่างระหว่าง 2 โปรโตคอล พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 3 คะแนนประเมินคุณภาพของภาพรังสีระหว่างโปรโตคอล care dose และ low dose

Phase of vessel	คะแนนเฉลี่ยใน care dose	คะแนนเฉลี่ยใน low dose	p
Arterial phase	4.7 ± 0.3	4.6 ± 0.4	.705
Capillary phase	4.6 ± 0.4	4.6 ± 0.3	.655
Venous phase	4.6 ± 0.3	4.5 ± 0.3	.317
Over all	4.6 ± 0.3	4.6 ± 0.3	1.000

ในการเปรียบเทียบปริมาณรังสีระหว่างโปรโตคอล care dose และ low dose นั้น ระยะเวลาการบันทึกภาพมีผลโดยตรงต่อปริมาณรังสี ระยะเวลาการบันทึกภาพทำให้ปริมาณรังสีสูงขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้ ระยะเวลาการบันทึกภาพหลอดเลือดที่นำมาเปรียบเทียบ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.394$) (ตารางที่ 4) การลดปริมาณรังสีด้วยโปรโตคอล care dose ทำให้ปริมาณรังสีในการตรวจหลอดเลือดหนึ่งเส้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4 ค่า KAP ลดลงจาก 466.3 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ เป็น 342 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ คิดเป็นร้อยละ 26.5 ค่า K_a, r ลดลงจาก 28.2 mGy เป็น 19.4 mGy คิดเป็นร้อยละ 31.2 การลดปริมาณรังสี acquisition

ทำให้ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปริมาณรังสีทั้งสามค่า ได้แก่ tube voltage (kVp), tube current (mA), pulse width (msec) มีค่ามัธยฐานลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่ามัธยฐานของ pulse width ลดลงมากที่สุดจาก 56.7 msec เป็น 38.3 msec คิดเป็นร้อยละ 32.5 ส่วนค่า tube voltage และ tube current ลดลงร้อยละ 1.8 และ 2.9 ตามลำดับ จากการลดระยะเวลาในการเก็บภาพระยะที่ 1 จาก 5 วินาที เหลือ 4 วินาที ทำให้จำนวนภาพในระนาบ frontal และ lateral ลดลงจาก 56 เป็น 48 ภาพคิดเป็นร้อยละ 14.3 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรของการให้รังสี (exposure) และปริมาณรังสีในหลอดเลือดเดียวกัน ระหว่างโปรโตคอล care dose และ low dose

ตัวแปร	Care dose		Low dose		อัตราลดลง	p-value*
	mean ± SD	median (IQR)	mean ± SD	median (IQR)		
Acquisition time (sec)	13.5 ± 3.8	13.5 (12, 15.7)	13.8 ± 4.2	13 (12, 17)	3.7%	.394
Tube voltage (kVp)	69.1 ± 0.3	69 (69)	67.8 ± 1	67.7 (67, 68.8)	1.8%	.002*
Tube current (mA)	435.6 ± 1.6	435 (434.6, 436.7)	420.9 ± 6.1	422.5 (414.6, 424.6)	2.9%	.000*
Pulse width (msec)	54.9 ± 7.6	56.7 (48.8, 60.5)	38.3 ± 1.8	38.3 (37.1, 39)	32.5%	.000*
No. of frame (images)	55.5 ± 7.6	56 (49, 61)	50.1 ± 7.8	48 (46, 56)	14.3%	.001*
KAP ($\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$)	484 ± 68.4	466.3 (426, 544.6)	353.8 ± 62.9	342.7 (312.7, 377.3)	26.5%	.000*
K_a, r (mGy)	28.7 ± 4.05	28.2 (25.25, 32.2)	20.3 ± 4.2	19.4 (17.8, 22.2)	31.2%	.000*

IQR หมายถึง interquartile range (quartile1, quartile3) *Wilcoxon signed-rank test

KAP หมายถึง kerma area product, K_a, r หมายถึง reference air kerma

จากการเปรียบเทียบปริมาณรังสีในการรักษารวมหนึ่งครั้ง ระหว่างโปรโตคอล care dose และ low dose

พบว่า ค่าปริมาณรังสีที่ลดลงมากที่สุด คือ kerma air product ค่ามัธยฐาน ลดลงจาก 16,870 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ เป็น 10,909.4 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ คิดเป็นอัตราลดลงร้อยละ 35.3 รองลงมาคือ peak skin dose ลดลงจาก 769 mGy เป็น 523 mGy คิดเป็นอัตราลดลง

ร้อยละ 31.99 ค่ามัธยฐานของ referene air kerma ลดลงจาก 1,280 mGy เป็น 928.1 mGy คิดเป็นอัตราลดลงร้อยละ 27.5 จำนวนภาพ เวลา fluoroscopy, kerma area product, reference air kerma และ peak skin dose ของโปรโตคอล care dose และ low dose แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตัวแปรที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ คือ จำนวนการบันทึกภาพ (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบปริมาณรังสีระหว่างโปรโตคอล care dose และ low dose ในการรักษาหนึ่งครั้ง

ตัวแปร	Care dose		Low dose		อัตรา ลดลง	p-value*
	mean $\pm$ SD	median (IQR)	mean $\pm$ SD	median (IQR)		
No. of exp.	40.2 $\pm$ 15.2	33 (30.2, 53.2)	33.06 $\pm$ 10.1	29 (25.2, 41)	12.1%	.056
No. of frame	1584.9 $\pm$ 665.7	1393 (1163, 1883)	1007 $\pm$ 453	884 (636, 1268)	36.5%	.007*
Flu. time(sec)	77.27 $\pm$ 50.77	76.5 (28.6, 110.2)	65.3 $\pm$ 43.3	54.1 (29.8, 98.2)	29.3%	.017*
KAP (μ Gy.m ²)	20233.4 $\pm$ 8691.8	16870 (15028, 26599.7)	12949.3 $\pm$ 6436.3	10909.4 (8620.1, 16401)	35.3%	.001*
Ka, r (mGy)	1509.5 $\pm$ 736.1	1280 (827.3, 2063)	1111.4 $\pm$ 559.7	928.1 (755.3, 1412)	27.5%	.003*
PSD (mGy)	883.6 $\pm$ 441.3	769 (483, 1160)	612.3 $\pm$ 350.5	523 (358, 692)	31.99%	.003*

IQR หมายถึง Interquartile range (quartile1, quartile3) *Wilcoxon signed-rank test

KAP หมายถึง kerma area product, Ka, r หมายถึง reference air kerma, PSD หมายถึง peak skin dose

วิจารณ์

การลดปริมาณรังสีในการศึกษานี้ใช้วิธีลดปริมาณรังสีการบันทึกภาพ ปริมาณรังสี fluoroscopy และลดจำนวนภาพซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณรังสี การที่จำนวนการบันทึกภาพไม่ลดลงและไม่เพิ่มเวลา fluoroscopy แสดงให้เห็นว่าการลดตัวแปรการให้ปริมาณรังสีครั้งนี้ ไม่เป็นอุปสรรคต่อการทำงานของแพทย์สำหรับรังสีแพทย์ที่เป็นผู้ประเมินคุณภาพ 2 คนนั้น รังสีแพทย์คนหนึ่งเป็นผู้ช่วยในหัตถการรังสีร่วมรักษา รังสีแพทย์อีกคนหนึ่งเป็นแพทย์รังสีวินิจฉัย การประเมินครั้งนี้จึงเป็นมุมมองทั้งจากการวินิจฉัยและการรักษา คะแนนเฉลี่ยของภาพรังสีทั้งในหลอดเลือดแดง หลอดเลือดฝอย หลอดเลือดดำ และภาพรวมมีคุณภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าการลดปริมาณรังสีครั้งนี้ ไม่มีผลต่อคุณภาพของภาพหลอดเลือดทั้งในด้านการวินิจฉัยและด้านรังสีร่วมรักษา

ข้อจำกัดในการศึกษาค้นครั้งนี้คือ การที่แพทย์ฉีดสารทึบรังสีด้วยมือ และควบคุมการถ่ายภาพเอง จึงไม่สามารถกำหนดอัตราเร็วในการฉีดให้เท่ากันทุกครั้งได้ รวมถึงปริมาณสารทึบรังสีและระยะเวลาในการถ่ายภาพ ทำให้ความเข้ม (density) ของภาพแปรผันตามอัตราเร็วในการฉีดสารทึบรังสีของแพทย์ การลดข้อจำกัดทำโดยคัดเลือกหลอดเลือดที่มีระยะเวลาการบันทึกภาพในสองโปรโตคอลใกล้เคียงกันโดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ข้อจำกัดอีกประการจากการศึกษาย้อนหลังคือ การรักษาผู้ป่วยทั้ง 2 ครั้ง ถึงแม้จะเป็นแพทย์คนเดียวกัน แต่ผู้ป่วยบางรายมีวิธีการรักษาไม่เหมือนกันทั้งสองครั้ง เช่น glue และ liquid embolic agent (LEA) ซึ่งใช้โปรโตคอลการเอกซเรย์ต่างกัน เช่น การฉีด glue ใช้เทคนิค acquisition และการฉีด LEA ใช้เทคนิค road map ถึงแม้จะไม่ส่งผลต่อการประเมินคุณภาพของภาพหลอดเลือด แต่อาจมีผลต่อปริมาณรังสีตลอดการรักษา

ได้มีการศึกษาการลดปริมาณรังสีการบันทึกภาพ ที่ใช้วิธีเดียวกับการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ การศึกษาของ Hornamand¹¹

ได้ลดปริมาณรังสีจากการบันทึกภาพในผู้ป่วยตรวจหลอดเลือดสมองจาก 3.6 μ Gy/frame เป็น 1.2 μ Gy/frame เปรียบเทียบภาพหลอดเลือดด้านตรงข้ามในการตรวจครั้งเดียวกัน จากผู้ป่วย 10 ราย เปรียบเทียบหลอดเลือด 22 เส้น โดยแพทย์รังสีร่วมรักษา 2 คนประเมินคุณภาพของภาพหลอดเลือด ผลสรุปว่าการลดปริมาณรังสีไม่ทำให้คุณภาพแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณรังสี reference air kerma และ air kerma product ลดลงร้อยละ 61.28 และร้อยละ 61.24 อัตราการลดปริมาณรังสีมากกว่าการศึกษาค้นครั้งนี้ เนื่องจากการลดค่าจากโปรโตคอลมาตรฐานโรงพยาบาลในการศึกษาครั้งนี้ลดจากโปรโตคอล care dose Kahn¹² ได้ศึกษาการลดปริมาณรังสีในหัตถการรังสีร่วมรักษาผู้ป่วย 30 ราย โดยลดค่าปริมาณรังสีการบันทึกภาพจากโปรโตคอลมาตรฐานโรงพยาบาลคือ 3.6 μ Gy/ frame เป็น 1.2 μ Gy/ frame ลดปริมาณรังสี fluoroscopy จาก 45 nGy/ frame เป็น 35 nGy/ frame เปลี่ยนเทคนิคการบันทึกภาพจากอัตราเร็วคงที่ (fixed rate) เป็นเทคนิคลดความเร็วตามระยะเวลา (variable frame rate) การปรับเปลี่ยนเทคนิคการบันทึกภาพ ทำให้ลดปริมาณรังสีได้ร้อยละ 55 โดยที่ไม่มีผลต่อระยะเวลาในการทำหัตถการและไม่มีผลต่อภาวะแทรกซ้อนจากการรักษา ถึงแม้การศึกษาของ Kahn จะลดค่าปริมาณรังสีเป็น 1.2 μ Gy/ frame เท่ากับการศึกษาค้นครั้งนี้ แต่เป็นการลดจากค่าปริมาณรังสีมาตรฐานจากโรงพยาบาล คือ 3.6 μ Gy/frame และโปรโตคอลอัตราเร็วคงที่ซึ่งมีการบันทึกภาพจำนวนมาก จึงทำให้อัตราการลดปริมาณรังสีมากกว่าการศึกษาค้นครั้งนี้ Yi¹³ ศึกษาย้อนหลังในผู้ป่วยตรวจหลอดเลือดสมอง 138 ราย โดยลดปริมาณรังสี acquisition จาก 2.4 μ Gy/frame เป็น 1.2 μ Gy/frame ผลสรุปว่าค่าปริมาณรังสี air kerma ลดลงจาก 1,841.5 mGy เป็น 1,274.8 mGy ค่าPKA จาก 23,215.5 μ Gy.m² เป็น 14,854 μ Gy.m² ปริมาณรังสีลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยไม่รบกวนคุณภาพของหลอดเลือด ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณรังสีคือ อายุของผู้ป่วยและตำแหน่งที่จะวินิจฉัย จากการศึกษาของ Soderman¹⁴ ในการตรวจเอกซเรย์หลอดเลือดสมอง

และหัตถการรังสีร่วมรักษาจำนวน 20 ราย ได้ศึกษาการลดปริมาณรังสีการบันทึกภาพจาก 2 $\mu\text{Gy}/\text{frame}$ เป็น 0.7 $\mu\text{Gy}/\text{frame}$ และลด tube voltage จาก 78 kVp เป็น 75 kVp เพิ่มการกรองรังสีได้แก่ copper filter ความหนา 0.1 มม. และ aluminum filter ความหนา 0.1 มม. ลดขนาด focal spot จาก 0.7 มม. เป็น 0.4 มม. ทำการศึกษาจากการตรวจหลอดเลือดสมองครั้งเดียวกัน จากการประเมินคุณภาพโดยรังสีแพทย์ระบบประสาท 3 คน พบว่าคุณภาพจากโปรโตคอลทั้งสองไม่แตกต่างกัน ปริมาณรังสีลดลงร้อยละ 25.3

มีการศึกษาที่ลดปริมาณรังสีด้วยวิธีอื่น เช่น การเปลี่ยนการกรองรังสี (filtration) และขนาด focal spot ได้แก่ Kim¹⁵ ศึกษาโดยทดลองใน phantom และในผู้ป่วยจริงจำนวน 5 ราย โดยเปรียบเทียบหลอดเลือดด้านตรงข้ามในการตรวจครั้งเดียวกันจากการทดลองใน phantom พบว่า การเพิ่มการกรองรังสีทำให้ค่าปริมาณรังสี air kerma ลดลงร้อยละ 40-50 DAP (dose area product) ลดลงร้อยละ 25-40 โดยไม่รบกวนคุณภาพของภาพหลอดเลือด การเพิ่มการกรองรังสีจะลดปริมาณรังสีพลังงานต่ำซึ่งเป็นรังสีที่ไม่ทะลุทะลวงผ่านเนื้อเยื่อไปสู่อุปกรณ์รับภาพ ผลการศึกษาระบุว่า การตรวจเอกซเรย์หลอดเลือดสมองควรใช้การกรองรังสีด้วย copper filter อย่างน้อย 0.1 มม. ส่วนการเปลี่ยนแปลงขนาด focal spot ไม่มีผลต่อปริมาณรังสีและคุณภาพของภาพหลอดเลือด โปรโตคอล low dose ในการศึกษาครั้งนี้ไม่ปรับเปลี่ยนค่าการกรองรังสี เนื่องจากมีการกรองรังสีด้วย copper 0.1-0.3 มม. แล้ว

สำหรับค่าปริมาณรังสีในหัตถการรังสีร่วมรักษาที่มีรายงานในประเทศไทย ได้แก่ การศึกษาของ Riabroi¹⁶ ศึกษาในผู้ป่วยหัตถการรังสีร่วมรักษาระบบประสาท 54 ราย ค่า DAP เฉลี่ย 406.2 $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ และค่า PSD เฉลี่ย 1,009.7 mGy การศึกษาของ Boonkum⁶ ศึกษาผู้ป่วยหัตถการรังสีร่วมรักษาระบบประสาทจำนวน 100 ราย ปริมาณรังสี air kerma ในผู้ป่วย Brain AVM เฉลี่ย 1,281.82 mGy ผู้ป่วย Dural AVM เฉลี่ย 1,833.70 mGy สำหรับวารสารวิชาการต่างประเทศมีการศึกษาของ Hassen⁷ ศึกษาปริมาณรังสีในหัตถการรังสีร่วมรักษาผู้ป่วยโรค AVF/ AVM 33 ราย พบว่า dose area product มีค่าเฉลี่ย 163.3 $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ และ air kerma มีค่าเฉลี่ย 1,709 mGy ปริมาณรังสีอ้างอิง (reference dose levels) ของสหรัฐอเมริกาสำหรับหัตถการรังสีร่วมรักษาในการรักษาโรค Brain AVM 75th percentile ของ kerma air product มีค่า 479 $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ และ 75th percentile ของ reference air kerma มีค่า

5.3 Gy^3 ในขณะที่ปริมาณรังสีในหัตถการรังสีร่วมรักษาในโรค Brain AVM ในประเทศฝรั่งเศส รวบรวมข้อมูลจากโรงพยาบาล 13 แห่ง ผู้ป่วยจำนวน 239 ราย kerma air product มีค่ามัธยฐาน 169.9 $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ reference air kerma มีค่ามัธยฐาน 2019 mGy¹⁷ โดยที่โปรโตคอล low dose จากการศึกษาครั้งนี้ kerma air product มีค่ามัธยฐาน 10909.4 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ (109.09 $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$) และ reference air kerma มีค่ามัธยฐาน 928.1 mGy จะเห็นได้ว่า ค่าปริมาณรังสีจากโปรโตคอล low dose ในการศึกษาครั้งนี้ต่ำกว่าการศึกษาอื่นๆ

ข้อจำกัดโดยรวมของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ การใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวนน้อย เป็นการศึกษาในสถานพยาบาลเพียงแห่งเดียว โดยใช้เครื่องเอกซเรย์หลอดเลือดเพียงเครื่องเดียว และไม่สามารถควบคุมตัวแปรบางชนิดได้ เช่น อัตราการขยายภาพ ความยากง่ายของรอยโรค เป็นต้น นอกจากนี้การประเมินคุณภาพโดยรังสีแพทย์ใช้เพียงค่าเฉลี่ยของคะแนนรวม ไม่ได้นำส่วนคะแนนคุณภาพที่ลดลงในโปรโตคอลปริมาณรังสีต่ำมาวิเคราะห์อย่างเจาะจง

สรุป

การลดปริมาณรังสีจากโปรโตคอล care dose จากโรงงานด้วยเทคนิคการลดปริมาณรังสี acquisition ลดปริมาณรังสี fluoroscopy ต่อภาพ ลดจำนวนภาพ ทำให้ลดปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับอย่างมีนัยสำคัญ ไม่เพิ่มระยะเวลาการรักษาและไม่ผลกระทบต่อคุณภาพของหลอดเลือดสำหรับการวินิจฉัยของแพทย์ จึงเป็นโปรโตคอลที่สามารถใช้สำหรับงานรังสีร่วมรักษาระบบประสาทรวมทั้งงานตรวจหลอดเลือดสมอง เพื่อให้ผู้ป่วยได้รับปริมาณรังสีน้อยที่สุด ลดความเสี่ยงจากผลแทรกซ้อนของรังสี และยังคงรักษาคุณภาพของภาพหลอดเลือดสำหรับการวินิจฉัย สามารถทำการรักษาโรคได้ตามเป้าหมาย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ แพทย์หญิงปัญจมา เลิศบุษยานุกุล ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำการวิจัย ขอขอบคุณนายแพทย์พิเชษฐ เมธารักษ์ชีพ ที่ช่วยประเมินคุณภาพในงานวิจัย ขอขอบคุณคุณพิมพ์ชนก พุ่มขาว หัวหน้าศูนย์วิจัย สถาบันประสาทวิทยา ที่ช่วยให้คำปรึกษาด้านการวิเคราะห์สถิติ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ในศูนย์วิจัย และเจ้าหน้าที่ในกลุ่มงานประสาทรังสีวิทยา ทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี

References

1. Huda W. Kerma-area product in diagnostic radiology. *AJR Am J Roentgenol* 2014; 203:w565-9.
2. Navarro VCC, Navarro MVT, Maia AF, Oliveira ADD, Oliveira ASP. Evaluation of medical radiation exposure in pediatric interventional radiology procedures. *Radiol Bras* 2012 ; 45:210-4.
3. Miller DL, Kwon D, Bonavia GH. Reference levels for patient radiation doses in interventional radiology: proposed initial values for U.S. practice. *Radiology* 2009; 253:753-64.
4. Roman T, Szajner M, Karska K, Markowicz-Roman J, Hac K, Kramarz E, et al. Radiation exposure in interventional neuroradiology. *Post N Med* 2017; 4:233-6.

5. Ihn YK, Kim BS, Byun JS, Suh SH, Won YD, Lee DH, et al. Patient radiation exposure during diagnostic and therapeutic procedures for intracranial aneurysms: a multicenter study. *Neurointervention* 2016; 11:78-85.
6. Boonkum K, Sriam J, Suwannasit T, Chongsaksakun Y, Suwanbundit A. Radiation dose to patient in intervention radiology. *Journal of Thai radiological technologists and nurses club in vascular and interventional radiology* 2007; 1:38-45.
7. Hassen AE, Amelot S. Radiation exposure during neurointerventional procedures in modern biplane angiography system: a single- site experience. *Interv Neurol* 2017;6:105-16.
8. Miller DL, Balter S, Cole PE, Lu HT, Berenstein A, Albert R, et al. Radiation dose in interventional radiology procedures: the RAD-IR study: part II skin dose. *J Vasc Interv Radiol* 2003; 14:977-90.
9. Balter S, Hopewell JW, Miller DL, Wagner LK, Zelefsky MJ. Fluoroscopically guided interventional procedures: a review of radiation effects on patients' skin and hair. *Radiology* 2010; 254:326-41.
10. Stecker MS, Balter S, Towbin RB, Miller DL, Vano E, Bartal G, et al. Guidelines for patient radiation dose management. *J Vasc Interv Radiol* 2009; 20:S263-73.
11. Honarmand AM, Shaibani A, Pashaei T, Syed FH, Hurley MC, Sammet CL, et al. Subjective and objective evaluation of image quality in biplane cerebral digital subtraction angiography following significant acquisition dose reduction in a clinical setting. *J Neurointerv Surg* 2016; 9:297-301.
12. Kahn EN, Gemmete JJ, Chaudhary N, Thompson BG, Chen K, Christodoulou EG, et al. Radiation dose reduction during neurointerventional procedures by modification of default setting on biplane angiography equipment. *J Neurointerv Surg* 2016; 8:819-23.
13. Yi HJ, Sung JH, Lee DH, Kim SW, Lee SW. Analysis of radiation doses and dose reduction strategies during cerebral digital subtraction angiography. *World Neurosurg* 2017; 100:216-23.
14. Soderman M, Holmin S, Andersson T, Palmgren C, Babic D, Hoornaert. Image noise reduction algorithm for digital subtraction angiography: Clinical results. *Radiology* 2013; 269:553-60.
15. Kim DJ, Park MK, Jung DE, Kang JH, Kim BM. Radiation dose reduction without compromise to image quality by alterations of filtration and focal spot size in cerebral angiography. *Korean J Radiol* 2017; 18: 722-8.
16. Riabroi K, Khanungwanitkul K, Wattanapongpitak P, Krisanachinda A, Hongsakul K. Patient radiation dose in neurointerventional radiologic procedure: a tertiary care experience. *Neurointervention* 2018; 13:110-6.
17. Etard C, Bigand E, Salvat C, Vidal V, Beregi JP, Hornbeck A, Greffier J. Patient dose in interventional radiology: a multicenter study of the most frequent procedures in France. *Eur Radiol* 2017;27:4281-90.