ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ ความสัมพันธ์แบบสามมิติระหว่างความเค้นและความเครียดของหลอดเลือดเอออร์ตา

ผู้เขียน นางสาวพรรณไท คำแดงยอดไตย

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์ ดร. ประดิษฐ์ เทอดทูล	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศันสนีย์ เอื้อพันธ์วิริยะกุล	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

หลอดเลือดเอออร์ตาเป็นท่อที่มีลักษณะยืดหยุ่นสำหรับเป็นช่องการไหลของเลือดซึ่งเป็นตำแหน่งที่มักเกิดโรคทางหัวใจและหลอดเลือดเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้าง สิ่งหนึ่งที่จะสามารถบอกเป็นนัยได้ถึงการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างนั่นก็คือการเปลี่ยนแปลงถึงคุณลักษณะเชิงกลของหลอดเลือด งานวิจัยนี้จึงได้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองความสัมพันธ์แบบสามมิติระหว่างความเค้นและความเครียดของหลอดเลือดเอออร์ตาและเพื่อทำนายการกระจายความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นในผนังหลอดเลือดเอออร์ตาโดยทำการสร้างสมการความสัมพันธ์ในระหว่างที่หลอดเลือดเอออร์ตารับภาระจากการไหลของเลือดที่อยู่ภายในตลอดวงรอบหัวใจ หลอดเลือดเอออร์ตาที่เกิดการเสียรูปเนื่องจากภาระรวมที่เกิดจากการพองตัวออกและการยืดขยายออกตามแนวแกนหลอดเลือดจะพิจารณาได้จากสมการพลังงานความเครียดที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรทราบค่าทางวัสดุในทั้งสามมิติ ทำการเปรียบเทียบข้อมูลความดันภายในช่องการไหลจากแบบจำลองด้วยข้อมูลจากการทดลองที่ได้จากข้อมูลการกระจัดจากเทคนิคการสร้างภาพหลอดเลือดเอออร์ตาแบบไม่รุกล้ำในร่างกายในหนูซึ่งได้รับการสนับสนุนข้อมูลจากห้องวิจัยการสร้างภาพอัลตราซาวด์และความยืดหยุ่น ภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์และรังสีวิทยา มหาวิทยาลัยโคลัมเบีย เมืองนิวยอร์ค ประเทศสหรัฐอเมริกา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในการทดลองกับหนูสุขภาพดีห้าตัว ความดันภายในช่องการไหลที่กระทำในเกิดภาระแก่ผนังด้านในของหลอดเลือดเป็นเหตุให้เกิดการเคลื่อนตัวของผนังหลอดเลือด จากนั้นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดเลือดเอออร์ตาเฉพาะแห่งจะหาได้จากใช้เทคนิคข้ามความสัมพันธ์จากสัญญาณอัลตราซาวด์และใช้กลศาสตร์ความต่อเนื่องในการแก้ปัญหา โครงร่างของผนังหลอดเลือดกำหนดให้เป็นท่อทรงกระบอกที่มีผนังหนาสามชั้นคือชั้นอินทิมา ชั้นมีเดีย และชั้นแอดเวนทิเชีย แต่ละชั้นของหลอดเลือดมีการใช้สมการความสัมพันธ์แบบเส้นใยเสริมแรงเพื่อแสดงถึงพฤติกรรมของชั้นหลอดเลือดแบบยืดหยุ่นไม่เป็นเชิงเส้นและใช้วิธีกำลังสองต่ำสุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นในการหาค่าตัวแปรทราบค่าที่เกี่ยวข้อง จากนั้นโปรแกรมการจำลองจะนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากโปรแกรมและผลจากงานวิจัยก่อนหน้า แบบจำลองทางกลศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ได้มีการต่อยอดไปใช้กับข้อมูลการทดลองจากมนุษย์และจากนั้นจึงนำไปใช้ในการทำนายถึงความเสียหายของหลอดเลือดที่เกิดขึ้นจากผลของความดันภายในช่องการไหล ในแบบจำลองนี้ได้พิจารณาผนังหลอดเลือดให้เป็นท่อที่มีลักษณะยืดหยุ่นแบบไม่เป็นเชิงเส้น มีรูปทรงเป็นทรงกระบอกตรงสามมิติผนังหนาห้าชั้นที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันและรับภาระกระทำรวมจากการพองตัวออกและการยืดขยายออกตามแนวแกนหลอดเลือด มีการใช้สมการความสัมพันธ์แบบเส้นใยเสริมแรงในชั้นหลักทั้งสามชั้นนั่นคือชั้นอินทิมา ชั้นมีเดียและแอดเวนทิเชียและใช้สมการความสัมพันธ์แบบวัสดุไอโซทรอปิคในอีกสองชั้นนั่นคือชั้นเอนโดทิเลียมและชั้นอิลาสติกลามินา ตัวแปรทราบค่าที่จำเป็นสำหรับในแต่ละชั้นหลอดเลือดได้มาจากวิธีการกำลังสองต่ำสุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ทำให้สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองแบบไม่รุกล้ำในร่างกายของหลอดเลือดเอออร์ตามนุษย์

ได้มีการเปรียบเทียบผลที่คำนวณได้จากโปรแกรมกับการศึกษาก่อนหน้านี้ซึ่งมีความสอดคล้องกันดีโดยค่ากำลังสองของสัมประสิทธ์สหสัมพันธ์มีค่าสูงกว่า 0.99 ในทุกกรณีที่ทำการเปรียบเทียบ ผลจากแบบจำลองเชิงกลที่ได้จากข้อมูลการทดลองกับหนูพบว่าค่ารากของความคลาดเคลื่อนกำลังสองต่ำสุดจากข้อมูลความดันที่หามาเพื่อแสดงถึงความสอดคล้องกันระหว่างข้อมูลจากแบบจำลองและข้อมูลการทดลองนั้นมีค่าที่ดีโดยมีค่าเป็น 0.5087 กิโลปาสคาล ทำการยืนยันชุดตัวแปรทราบค่าที่เกี่ยวข้องด้วยวิธีพลังงานความเครียดต่ำสุด จากนั้นจึงสามารถทำนายการกระจายความเค้นและความเครียดได้จากแบบจำลองนี้ ผลจากแบบจำลองเชิงกลที่ได้จากข้อมูลการทดลองกับมนุษย์พบว่าสามารถหาค่าตัวแปรทราบค่าที่เกี่ยวข้องได้อย่างดีโดยมีค่ารากของความคลาดเคลื่อนกำลังสองต่ำสุดมีค่าเป็น 0.5631 กิโลปาสคาล ซึ่งสามารถแสดงภาพการกระจายความเค้นและความเครียดเฉพาะแห่งที่เกิดขึ้นในผนังหลอดเลือดในสภาวะที่เกิดการเสียรูปได้และจากนั้นจึงทำการทำนายถึงพื้นที่ของผนังที่เกิดการแตกออกจากการแปรค่าความดันในช่วงทางสรีรศาสตร์และเหนือกว่านั้น ได้มีการอธิบายผลของค่าความดันที่มีต่อการแตกออกของหลอดเลือด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ไว้จากการใช้แบบจำลองใหม่นี้ที่ได้จำลองผนังหลอดเลือดที่มีหลายชั้นแบบสามมิติ ในทางปฏิบัติแล้วแบบจำลองแบบสามมิติที่มีผนังหลายชั้นที่ได้จากข้อมูลแบบไม่รุกล้ำในร่างกายนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ช่วยในการทำนายการกระจายความเค้นและความเครียดและจากนั้นก็สามารถทำนายถึงการเริ่มต้นและการกระจายของพื้นที่การแตกออกของหลอดเลือดได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Thesis Title Three Dimensional Stress and Strain Relationship of Aortic Vessel

Author Miss Pannathai Khamdaengyodtai

Degree Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

Thesis Advisory Committee

Professor Dr. Pradit Terdtoon	Advisor
Assistant Professor Dr. Sansanee Auephanwiriyakul	Co-advisor
Assistant Professor Dr. Phrut Sakulchangsatjatai	Co-advisor

ABSTRACT

The aorta is an elastic conduit for blood flow where many cardiovascular diseases caused by structural changes often occur. One of the implications of the structural changes is the change in mechanical properties of the blood vessel. This research, therefore, aims to construct constitutive equations for three dimensional stress and strain relationship model of aortic vessel and to predict stress and strain distribution in aortic vessel wall. Constitutive equations are constructed while the aortic vessel is subjected by blood flow along cardiac cycle. Aortic vessel, which is deformed by combined load of inflation and extension, is considered using strain energy function relevant with three dimensional material parameters. Luminal pressure from the model based on displacement data *in vivo* non-invasive aortic vessel imaging technique in mouse is validated to luminal pressure from experiment. Experimental data are supported by the Ultrasound and Elasticity Imaging

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Laboratory (UEIL), Department of Biomedical Engineering and Radiology, Columbia University, New York, USA.

In experiments with five healthy mice, luminal pressure acted to inside wall is cause of wall movement and local aortic diameters can be obtained from cross-correlation technique on the ultrasound signal. Continuum mechanics is used as an approach to the results. Geometry of the vascular wall is modeled as cylindrical thick wall tube consisted of three layers corresponding to intima, media and adventitia. Constitutive equation of fiber reinforcement is used for each layer to representing nonlinear elastic behavior of the aorta and nonlinear lease square method is used to estimate relevant parameters. This developed model is then examined by comparing dependences from the model to dependences from previous studies. This new mechanical modeling is extended to use with human data and then used to predict arterial failure affected by luminal pressure. The arterial wall is considered as thick-wall three-dimension five-concentric axisymmetric layer straight circular cylindrical nonlinear elastic tube under combined extension and inflation. Constitutive equation of fiber-reinforced material is employed for three major layers of intima, media and adventitia and constitutive equation of isotropic material is employed for other two layers of endothelium and internal elastic lamina. Relevant parameters for each layer are obtained by using nonlinear least square method fitted to *in vivo* non-invasive experimental data on human aorta.

The predictions from our computational program are compared with previous studies and good agreements are obtained with square of correlation coefficient more than 0.99 for all cases. Results from mechanical modeling based on experimental of mice, root of minimizes function of mean square error of pressures used to represent

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

the consistent of the model and experiment are good obtained by value of 0.5087 kPa. Sets of relevant parameters are ensured by using minimum energy function. The stresses and strains distributions can be predicted by this modeling. Results from mechanical modeling based on experimental of human, parameters could be precisely obtained with root of minimizes function of mean square error of pressures of 0.5631 kPa. Local stresses and strains distribution across deformed arterial wall could be illustrated, and consequently the rupture area could be predicted by varying luminal pressure in physiological range and beyond. The effect of pressure to arterial failure has been interpreted based on this new developed three-dimension multilayer arterial wall model. Practically, the present three-dimension multilayer model based on *in vivo* non-invasive data is shown to be as an implement to predict stresses and strains distributions and consequently to predict model initiated and propagated rupture area of the arterial wall.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved