บทความ

ดร.สมบูรณ์ โอตรวรรณะ
somboono@mtec.or.th
ห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ
หน่วยวิจัยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วย
• ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

การทดสอบทางกลตามมาตรฐานสำหรับ ล้ออัลลอย และบทบาทของการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Standard Mechanical Tests for Alloy Wheels and the Role of Finite Element Simulation)

ล้ออัลลอย (alloy wheel) คือ ล้อที่ผลิตมาจากอะลูมิเนียมผสม (aluminium alloy) หรือแมกนีเซียมผสม (magnesium alloy) สำหรับใช้กับรถยนต์ประเภทต่างๆ โลหะผสมทั้งสองประเภทนี้มีสมบัติเด่น คือ เบากว่าเหล็กกล้า (steel) มาก โดยอะลูมิเนียมและแมกนีเซียมบริสุทธิ์มีความหนาแน่นประมาณ 1/3 และ 1/4 ของเหล็กกล้าตามลำดับ การใช้ล้ออัลลอยแทนล้อเหล็กกล้าจะช่วยลดน้ำหนักรวมของยานพาหนะซึ่งส่งผลดีต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและความเร่งของรถ นอกจากนี้ ล้ออัลลอยยังขึ้นรูปเป็นรูปทรงได้หลากหลายและสวยงามกว่าล้อเหล็กกล้าอีกด้วย (ภาพที่ 1)

ล้ออัลลอย

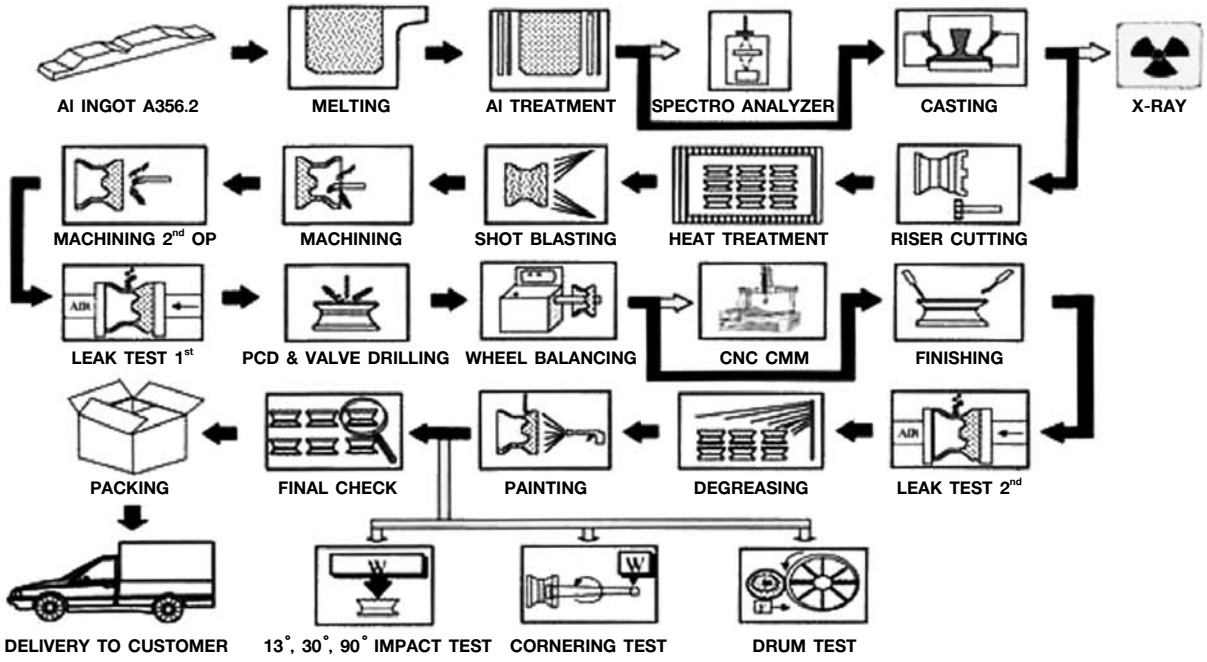
ล้อเหล็กกล้า

ภาพที่ 1 รูปลักษณ์ของล้ออัลลอยและล้อเหล็กกล้า

การผลิตล้ออัลลอยในยุคแรกๆ ส่วนใหญ่ทำจากแมกนีเซียมผสมเนื่องด้วยข้อจำกัดด้านความเหนียว (ductility) ของอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการหล่อ ดังนั้น จึงมีการเรียกล้ออัลลอยอย่างไม่เป็นทางการว่า “ล้อแม็ก (mag wheel)” ต่อมาเมื่อเทคโนโลยีการหล่ออะลูมิเนียมผสมได้รับการพัฒนาจนสามารถทำโครงสร้างจุลภาคที่มีเกรนขนาดเล็กลงได้ [1] ทำให้ความนิยมในการผลิตล้ออัลลอยจากอะลูมิเนียมผสมเพิ่มมากขึ้น

ล้ออัลลอยสำหรับรถยนต์ปกติทั่วไปในท้องตลาดทำจากอะลูมิเนียมผสม ส่วนล้อแมกนีเซียมผสมนั้นได้รับความนิยมลดลงไปเนื่องจากข้อด้อยหลายประการ เช่น ความต้านทานการกัดกร่อน ความแข็งแรงทางกล ความสวยงามของผิว และความปลอดภัยในด้านการติดไฟและลุกไหม้

ปัจจุบันล้ออัลลอยส่วนใหญ่ผลิตจากอะลูมิเนียมผสมโดยกระบวนการหล่อด้วยแรงดันต่ำ (low pressure die casting) หรือกระบวนการหล่อด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity die casting) จากนั้นนำล้อที่ผ่านการหล่อไปอบชุบด้วยกระบวนการทางความร้อน (heat treatment) ก่อนจะนำไปกัด กลึง และเจาะรู (machining) ให้ได้รูปร่างสุดท้ายตามที่ออกแบบไว้ และนำล้อเข้าสู่กระบวนการทำสีและเคลือบผิวต่อไป (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 แผนภูมิแสดงกระบวนการผลิตล้ออัลลอย

ภาพจาก http://www.intelorg.com.sg/Alloy%20Wheel%20Projects.htm

การทดสอบทางกลตามมาตรฐาน

ในบางประเทศ เช่น ญี่ปุ่น ได้มีกฎหมายกำหนดว่าล้ออัลลอยจะต้องผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน [2] โดยมาตรฐานการทดสอบที่ได้รับการยอมรับในวงกว้าง เช่น JWL (Japan Light Alloy Wheel) standard [3] และ SAE (Society of Automotive Engineers) J2530 [4] มาตรฐาน JWL นั้นเป็นที่ยอมรับในวงการว่าเหมาะกับทุกสภาพถนน ดังนั้น ล้ออัลลอยที่จำหน่ายในทวีปเอเชียและยุโรปจึงมีเครื่องหมายของมาตรฐาน JWL ให้เห็นอยู่โดยทั่วไป [3] (ภาพที่ 3)

ภาพที่ 3 สัญลักษณ์เครื่องหมายของมาตรฐาน JWL บนล้ออัลลอย

การทดสอบทางกลของล้ออัลลอยตามมาตรฐานทั่วไปประกอบด้วย

1. การทดสอบความล้าตามมุมในเชิงพลวัต (Dynamic Cornering Fatigue Test) เป็นการจำลองภาระทางกลที่ล้อจะได้รับเมื่อรถเลี้ยวหักมุม ซึ่งเครื่องทดสอบสามารถเลือกใช้ได้ทั้งแบบที่ล้ออยู่นิ่งและแบบที่ล้อหมุน (ภาพที่ 4) เครื่องทดสอบแบบที่ล้ออยู่นิ่งจะจับยึดล้อทดสอบไว้และรับภาระโมเมนต์ดัด (bending moment) ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจากเพลาขับที่กำลังหมุนโดยมีก้อนน้ำหนักที่ไม่สมดุลติดอยู่ ส่วนเครื่องทดสอบแบบที่ล้อหมุนจะหมุนล้อทดสอบโดยที่มีโมเมนต์ดัดที่คงที่กระทำต่อล้อดังภาพการทดสอบจริง (ภาพที่ 5)

มาตรฐาน JWL กำหนดว่า ล้อทดสอบจะต้องผ่านการรับภาระนี้อย่างน้อย 100,000 รอบ โดยไม่เกิดรอยแตก (crack) ส่วนค่าภาระโมเมนต์ดัดที่ใช้ทดสอบ (*M*) ในหน่วย N-m คำนวณได้จากสมการ

$$M = 1.5 \cdot F_v \cdot g\,(\mu \cdot R_{dyn} + d)$$

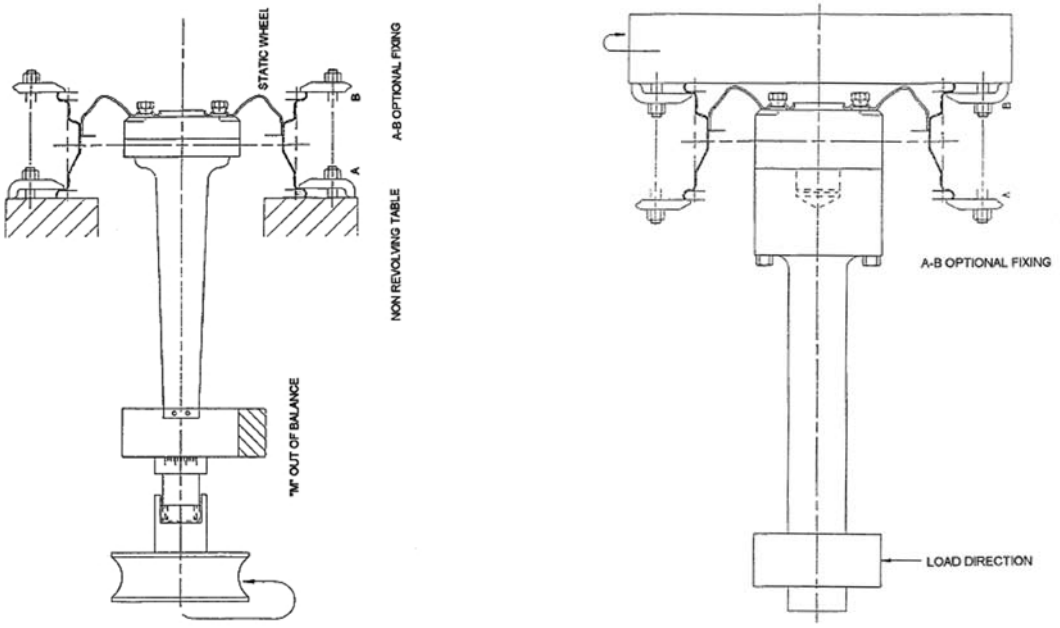
โดย F_v คือ ภาระสูงสุด (maximum load) ที่ล้อรับได้ มีหน่วยเป็น kg

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งมีค่าประมาณ 9.81 m/s^2

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางกับพื้นถนน ซึ่งตามมาตรฐาน JWL ถือว่ามีค่า 0.7

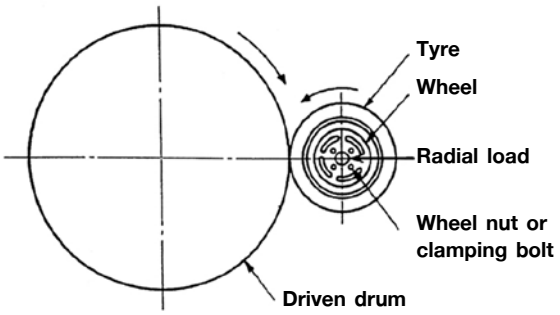
R_{dyn} คือ รัศมีของการหมุนสูงสุดของยางที่กระทำต่อล้อ มีหน่วยเป็น m

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของยาง มีหน่วยเป็น m



ภาพที่ 4 ภาพวาดแสดงเครื่องทดสอบความล้าตามมุมในเชิงพลวัตแบบที่ล้ออยู่นิ่ง (ซ้าย) และแบบที่ล้อหมุน (ขวา)
ภาพจาก http://www.euwa.org/images/auto/euwa_std_318.pdf

ภาพที่ 5 การทดสอบจริงบนเครื่องทดสอบความล้าตามมุมในเชิงพลวัต
ภาพจาก http://www.koseieurope.com/eng/etest-kosei.htm



ภาพที่ 6 ภาพวาดแสดงเครื่องทดสอบความล้าตามแนวรัศมีในเชิงพลวัต
ภาพจาก "Light Alloy Disc Wheels for Automobiles", CNS 7135, Chinese National Standards, Bureau of Standards, Metrology and Inspection, Ministry of Economic Affairs, R.O.C. 1995

2. การทดสอบความล้าตามแนวรัศมีในเชิงพลวัต (Dynamic Radial Fatigue Test) เป็นการจำลองภาระในแนวรัศมีที่ล้อจะได้รับเมื่อรถวิ่งไปบนทางตรงปกติ โดยเครื่องทดสอบ (ภาพที่ 6) ซึ่งมีล้อขับ (driven drum) จะกดยางที่ประกอบกับล้อทดสอบด้วยแรงที่แสดงถึงน้ำหนักของตัวรถที่ถ่ายเทลงไปที่ล้อ จากนั้นล้อขับจะหมุนเพื่อขับให้ล้อทดสอบหมุนไปด้วยดังภาพการทดสอบจริงในภาพที่ 7 สำหรับมาตรฐาน JWL กำหนดว่าล้อทดสอบจะต้องผ่านการรับภาระนี้อย่างน้อย 500,000 รอบโดยไม่เกิดรอยแตกหรือสูญเสียแรงดันลมยาง (tire air pressure) สำหรับภาระแรงกดที่ใช้ทดสอบ (F_r) ในหน่วย N คำนวณได้จากสมการ

$$F_r = k \cdot F_v \cdot g$$

โดย F_v คือ ภาระสูงสุดที่ล้อรับได้ มีหน่วยเป็น kg

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งมีค่าประมาณ 9.81 m/s^2

k คือ ค่าตัวคูณโหลด (load factor) เพื่อให้การทดสอบไม่กินเวลามากเกินไป ซึ่งตามมาตรฐาน JWL ใช้ค่า 2.25

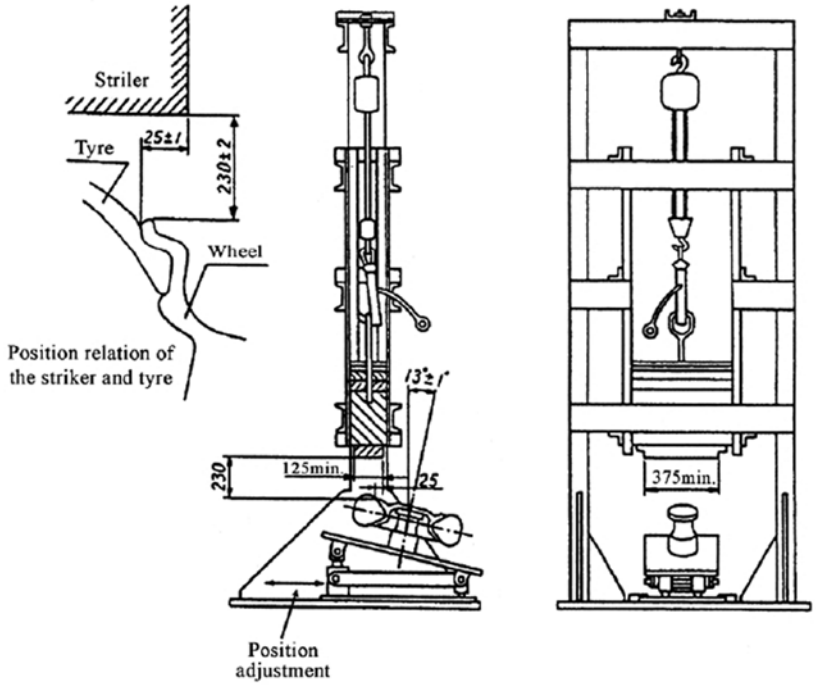
ภาพที่ 7 การทดสอบจริงบนเครื่องทดสอบความล้าตามแนวรัศมีในเชิงพลวัต
ภาพจาก http://www.koseieurope.com/eng/etest-kosei.htm

3. การทดสอบการกระแทก (Impact Test) เป็นการจำลองภาระจากการกระแทกของล้อเมื่อตกหลุมหรือชนกับขอบถนน ในการทดสอบล้ออัลลอยที่ใส่ยางแล้วจะถูกจับยึดไว้และเอียงทำมุม 13 องศากับแนวระดับตามมาตรฐาน JWL จากนั้นก้อนน้ำหนัก (striker mass) จะถูกปล่อยจากความสูงที่กำหนดลงมากระแทกตามตำแหน่งที่แสดงไว้ดังภาพที่ 8 และการทดสอบจริงบนเครื่องทดสอบการกระแทกดังภาพที่ 9 ตามมาตรฐาน JWL ล้ออัลลอยจะผ่านการทดสอบก็ต่อเมื่อไม่เกิดรอยแตกหรือสูญเสีย

แรงดันลมยาง สำหรับขนาดของก้อนน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ (D) ในหน่วย kg คำนวณได้จากสมการ

$$D = 0.6\,F_{\nu} + 180$$

โดย F_{ν} คือ ภาระสูงสุดที่ล้อรับได้ มีหน่วยเป็น kg



ภาพที่ 8 ภาพวาดเครื่องทดสอบการกระแทก

ภาพจาก "Light Alloy Disc Wheels for Automobiles", CNS 7135, Chinese National Standards, Bureau of Standards, Metrology and Inspection, Ministry of Economic Affairs, R.O.C. 1995

ภาพที่ 9 การทดสอบจริงบนเครื่องทดสอบการกระแทก

ภาพจาก http://www.leggera.eu/en/information/info-43.html

บทบาทของการจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรายละเอียดกระบวนการทดสอบทั้งสามตามมาตรฐานจะเห็นว่า การทดสอบจริงสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช่จ่ายค่อนข้างมากทั้งในส่วนของการทดลองผลิตล้อทดสอบและตัวการทดสอบเองที่เป็นการทดสอบแบบทำลาย (destructive test) ทำให้มีความจำเป็นที่ต้องนำเทคโนโลยีการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) [5] ซึ่งเป็นเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณทางวิศวกรรม (Computer Aided Technology: CAE) ที่สำคัญตัวหนึ่งมาช่วยในการออกแบบ

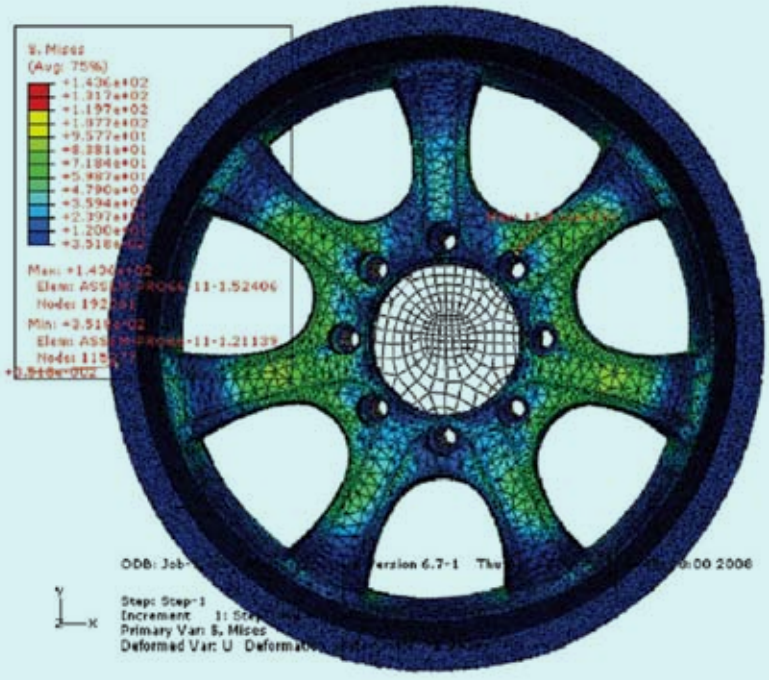
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ที่ช่วยประมาณผลลัพธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนที่โดยปกติจะไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นตรง (exact solution) ได้ ปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในงานวิศวกรรมรวมถึงการทดสอบทางกลของล้ออัลลอยตามมาตรฐานทั้งสามนี้สามารถเขียนอธิบายได้โดยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation) ต่างๆ เช่น สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยความสมดุลของของแข็งในสามมิติ (ภาพที่ 10) และการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยคำนวณคือ การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยต่างๆ เหล่านั้นนั่นเอง

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}+F_x=0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}+F_y=0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \sigma_z}{\partial z}+F_z=0$$

ภาพที่ 10 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยความสมดุลของของแข็งในสามมิติ [5]

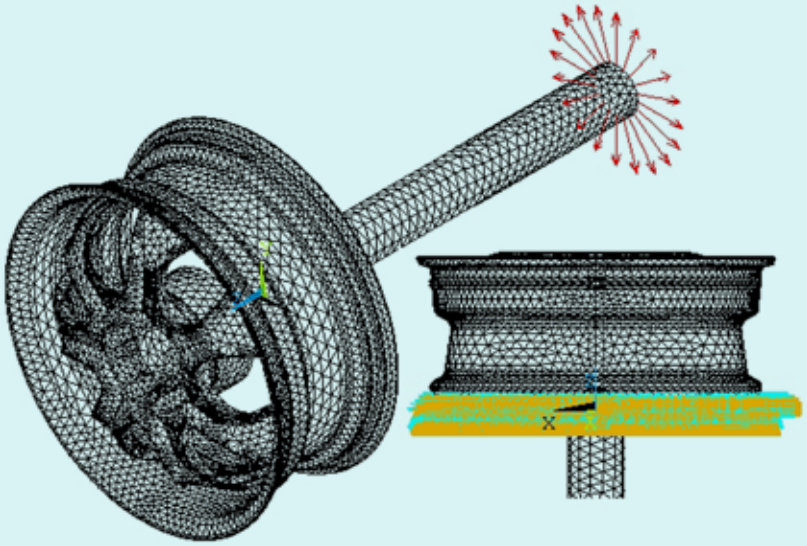


ภาพที่ 11 ตัวอย่างผลลัพธ์ของการกระจายตัวของค่าความเค้นในล้ออัลลอย
ภาพจาก L. Wang, Y. Chen, C. Wang and Q. Wang, "Fatigue life analysis of aluminum wheels by simulation of rotary fatigue test", Journal of Mechanical Engineering, Vol. 57 (1), 2011, pp. 31-39.

การนำเทคโนโลยีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยคำนวณผลลัพธ์ของปรากฏการณ์จะช่วยคาดคะเนผลของการทดสอบล้ออัลลอยได้ว่ามีโอกาสจะผ่านหรือไม่ผ่านมากเพียงไร ซึ่งจะช่วยในการตัดสินใจว่าควรจะนำล้อที่ได้ออกแบบไว้ไปทดสอบจริงหรือควรจะออกแบบใหม่ (re-design) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงในกรณีที่คิดว่ารูปร่างเดิมยังแข็งแรงไม่พอ (under-designed) หรือลดขนาดลงเพื่อการประหยัดเนื้อวัสดุในกรณีที่คิดว่าออกแบบเผื่อไว้มากเกินไป (over-designed) ยกตัวอย่างเช่น หากเราวิเคราะห์ไฟไนต์

เอลิเมนต์ของการทดสอบทางกลแล้วได้ผลลัพธ์ของการกระจายตัวของค่าความเค้นในล้ออัลลอยดังภาพที่ 11 เราก็สามารถพิจารณาได้ว่าควรจะปรับปรุงรูปร่างของล้อนี้หรือไม่

การนำเทคโนโลยีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการออกแบบและผลิตล้ออัลลอย (ภาพที่ 12) เป็นสิ่งที่บริษัทผู้ออกแบบและผลิตชั้นนำในปัจจุบันควรต้องมี อย่างไรก็ตามความซับซ้อนของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบทางกลตามมาตรฐานทั้งสามเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งจุดนี้เองอาจทำให้บริษัทผู้ออกแบบและผลิตล้ออัลลอยหลายบริษัทไม่เชื่อมั่นต่อผลการจำลองที่ได้และอาจยกเลิกการใช้การจำลองไปในที่สุด ดังนั้นการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของล้ออัลลอยนี้จึงต้องเลือกใช้วิธีจำลองให้เหมาะสมกับปัญหา เช่น การเลือกชนิดการวิเคราะห์ปัญหา การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) การแบ่งเอลิเมนต์ (meshing) การใส่ค่าสมบัติของวัสดุ (material properties) และการกำหนดเงื่อนไขของความเสียหาย (failure criteria) โดยการจะเลือกใช้ข้อมูลการจำลองต่างๆ เหล่านี้ได้อย่างเหมาะสมต้องอาศัยความรู้และประสบการณ์ในทั้งทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ วิศวกรรมเครื่องกล รวมถึงวิศวกรรมวัสดุด้วย



ภาพที่ 12 ตัวอย่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของการทดสอบความล้าตามมุมในเชิงพลวัต

ภาพจาก Y.-L. Hsu, C.-C. Yu, S.-C. Wu and M. H. Hsu, "Developing an automated design modification system for aluminum disk wheels", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 221 (3), 2007, pp. 447-456.

เอกสารอ้างอิง

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Alloy_wheel

[2] http://en.wikipedia.org/wiki/JWL_standard

[3] http://www.cartype.com/pages/2101/jwl_stamp_on_alloy_wheels

[4] http://www.sae.org/works/documentHome.do?docID=J3010&inputPage=wIpSdOcDeTaIlS&comtID=TEVWC

[5] ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, ปราโมทย์ เดชะอำไพ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542