Finite Element Method กับงานด้านวิศวกรรมโลหการและวัสดุศาสตร์

FINITE ELEMENT METHOD FOR METALLURGICAL ENGINEERING AND MATERIALS SCIENCE

วรภัทร์ ภู่เจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

WORAPHAT PHUCHAROEN

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Bangkok, Thailand

บทคัดย่อ

Finite Element Method (FEM) เป็นวิธีการคำนวณหาแรงเค้น ความเครียด การบิดเบี้ยว การกระจัดกระจายของอุณหภูมิ และอื่น ๆ ในโครงสร้างหรือชิ้นงาน โดยอาศัยการคำนวณจากคอมพิวเตอร์ ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา วิธีทาง FEM ส่วนใหญ่ได้พัฒนาและประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง จนกระทั่งเมื่อเร็ว ๆ นี้เองที่ FEM ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมโลหการและวัสดุศาสตร์ บทความนี้กล่าวถึง ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ FEM ในงานด้านวิศวกรรมโลหการและวัสดุศาสตร์ โดยเฉพาะการคำนวณหาแรงเค้น และรูปแบบการแตกหัก (cracking patterns) ในชิ้นส่วนเซรามิกส์ และเซรามิกส์ที่ใช้เคลือบบนผิวโลหะ (Thermal Barrier Coatings) นอกจากนี้ ยังกล่าวถึงการใช้ FEM ในการหาแรงเค้นในการผลิต Single crystal โดยวิธี Bridgman Technique การคำนวณหาแรงเค้นและการบิดเบี้ยว (deformation) ของเหล็กดามกระดูก (orthopaedic Implants) และกล่าวถึง Softwares ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์ (Mold Design) และงานด้านการหล่อโลหะ ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลต่อเนื่องเป็นระบบ Computer Integrated Manufacturing (CIM) ได้

SUMMARY

Finite Element Method (FEM) is a numerical method for computing stresses, strains, deformations, temperature distribution, and etc. in any structures by using computer. For more than 20 years, FEM has been used for structural engineering. Recently, FEM is introducing to the field of metallurgy and Materials science for determining stresses, strains, and cracking patterns of ceramic components, ceramic coatings, crystal growth system, orthopaedic implants and etc. Softwares for mold disign and casting which are parts of computer Integrated Manufacturing (CIM) are introduced.

บทนำ

ปัจจุบันนี้ คอมพิวเตอร์มีบทบาทอย่างมากในการคำนวณหาคำตอบต่าง ๆ ทางวิศวกรรม โดยเฉพาะ Finite Element Method (FEM) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณทางตัวเลขอย่างหนึ่ง (Numerical Method) ซึ่งต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ โดยทั่วไปแล้ว FEM จะใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างต่าง ๆ โดยผู้ใช้ FEM ส่วนใหญ่มักเป็นวิศวกรโครงสร้าง วิศวกรโยธา และวิศวกรเครื่องกล โครงสร้างเหล่านี้ถ้าจะใช้คำนวณโดยไม่อาศัยคอมพิวเตอร์คงทำได้ลำบาก และอาจจะผิดพลาดได้ง่าย เนื่องจากในปัจจุบันโครงสร้างต่าง ๆ มักจะใหญ่ สลับซับซ้อน และผู้วิเคราะห์ต้องออกแบบต้องเร่งวิเคราะห์ให้ทันกับเวลาด้วย

ในขณะเดียวกันที่เทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์และทางด้านโครงสร้างกำลังก้าวหน้าไป อย่างไม่หยุดยั้งนั้น เทคโนโลยีทางด้านโลหการ และวัสดุศาสตร์ก็ก้าวหน้าไปด้วยเช่นกัน จึงจำเป็นอยู่เองที่วิศวกรโลหการและนักวัสดุศาสตร์ จำต้องเรียนรู้วิชาการทางคอมพิวเตอร์และการวิเคราะห์โครงสร้างโดยอาศัยคอมพิวเตอร์เช่น FEM ด้วย เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการออกแบบโครงสร้างหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ออกมา ในทางตรงกันข้ามวิศวกรโครงสร้างและนักคอมพิวเตอร์ก็ควรจะมีความรู้ทางด้านโลหการและวัสดุศาสตร์ด้วยเช่นกัน

ในปัจจุบันโดยเฉพาะสถาบันวิจัยในต่างประเทศกำลังมุ่งความสนใจมาประยุกต์ใช้ FEM มาวิเคราะห์โครงสร้างทางเซรามิกส์ การวิเคราะห์สภาพแข็งตัวของผลึก การวิเคราะห์โครงสร้าง Composites เป็นต้น

ในบทความนี้ จะไม่กล่าวถึงทฤษฎีทางด้าน FEM เพราะคงจะหาอ่านได้ทั่วไป แต่จะยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้ทางด้านโลหการและวัสดุศาสตร์

1. การประยุกต์ใช้ FEM กับชิ้นส่วนหรือโครงสร้างเซรามิกส์

เซรามิกส์นั้นเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษและแตกต่างไปจากโลหะหรือโลหะอื่น ๆ คุณสมบัติที่สำคัญก็คือ สำหรับ Uniaxial Load แล้ว กำลังดึง (Tensile strength) น้อยกว่ากำลังกด (Compressive strength) มาก ๆ นั่นคือ ถ้าถูกดึงแล้วจะเปราะมากแตกหักแบบทันที ไม่เหมือนเหล็กซึ่งมีกำลังดึงสูงและยืดได้ คุณสมบัติอื่น ๆ ที่สำคัญของเซรามิกส์ ก็คือ น้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนทางเคมีสูง ทนทานการเสียดสี เป็นฉนวนกันความร้อนอย่างดี

ดังนั้น เซรามิกส์จึงถูกประยุกต์ใช้ในโครงสร้างที่ต้องทนต่อการกัดกร่อนและมีความร้อนสูง เช่น ในเครื่องจักรไอพ่น หรือเทอร์ไบน์ ใช้เป็นผิวนอกของยานอากาศ ใช้ในเครื่องยนต์ ฯลฯ

เพื่อที่จะวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างที่ต้องใช้เซรามิกส์ดังกล่าวนี้ การนำ FEM มาใช้เพราะสะดวกในการคำนวณโดยต้องคำนึงถึงสภาพการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) คุณสมบัติของเซรามิกส์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความเปราะต่อแรงดึงของเซรามิกส์ความฝืด ฯลฯ

รูปที่ 1 เป็นแบบทาง FE ของใบผัดเซรามิกส์ที่ใช้ในเครื่องจักรเทอร์ไบน์ (เอกสารอ้างอิง 1)

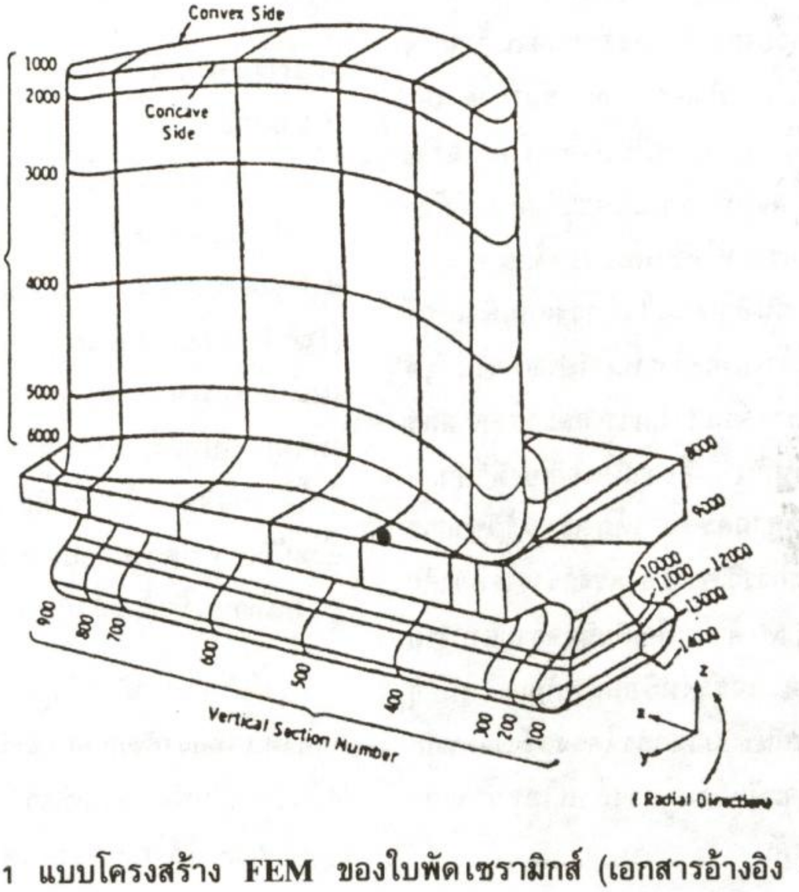
จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของใบพัดมีทั้งส่วนโค้งส่วนเว้ามากมาย และต้องใช้เป็นแบบ 3 มิติด้วยเซรามิกส์ที่ใช้ทำเป็นใบพัด คือ ซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) การคำนวณต้องคำนึงถึงสภาพที่ใบพัดถูกหมุนเมื่อหมุน 3600 รอบต่อนาที ซิลิกอนไนไตรด์ทนแรงกดได้สูงสุด 30124 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ฯลฯ

การใช้ FEM ทำให้ทราบถึงว่าบริเวณใดมีแรงเค้นเป็นอย่างไร ดังในรูปที่ 2 แสดงแรงเค้นตามแนวรัศมีมีหน่วยเป็น psi.

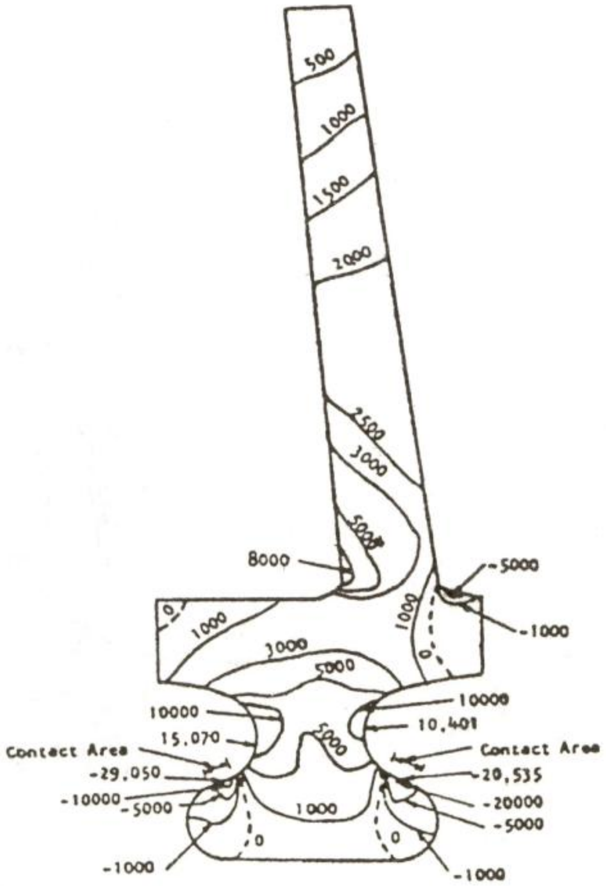
พบว่าแรงเค้นดึงสูงสุด คือ 15070 psi ตรงบริเวณที่รากของใบพัดซึ่งต้องสัมผัสกับเหล็กที่บีบรากใบพัดเอาไว้ ส่วนแรงเค้นกดสูงสุด คือ -29050 psi. ในบริเวณใกล้เคียงกัน ดังนั้น จะเห็นได้ว่า การใช้ใบพัดที่เป็นเซรามิกส์ทั้งใบ ไม่ว่าจะใช้ซิลิคอนไนไตรด์หรือซิลิกอนคาร์ไบด์ (SIC) ก็ตามโอกาสที่จะใบพัดเซรามิกส์จะแตกหักบริเวณรากนั้นมีมาก เพราะแรงเค้นดึงสูงกว่ากำลังดึงที่ทนได้ ส่วนแรงเค้นกดอั้นทนได้

จากข้อมูลดังกล่าวนี้เอง ทำให้นักออกแบบและวิจัยจำต้องหาวิธีการใหม่ เพื่อที่จะได้ใช้ใบพัดเซรามิกส์มาแทนใบพัดโลหะ ซึ่งเป็นโลหะผสมของไทเทเนียม (หรือ Superalloy)

แนวคิดใหม่ซึ่งแทนที่จะใช้ใบพัดเซรามิกส์ทั้งหมดเปลี่ยนมาเป็นการใช้ใบพัดโลหะแต่ว่าเคลือบด้วยเซรามิกส์แทน เป็นการแก้ปัญหาได้อย่างดี โดยให้บริเวณรากของใบพัดยังคงให้เป็นโลหะสัมผัสกับ



รูปที่ 1 แบบโครงสร้าง FEM ของใบพัดเซรามิกส์ (เอกสารอ้างอิง 1)



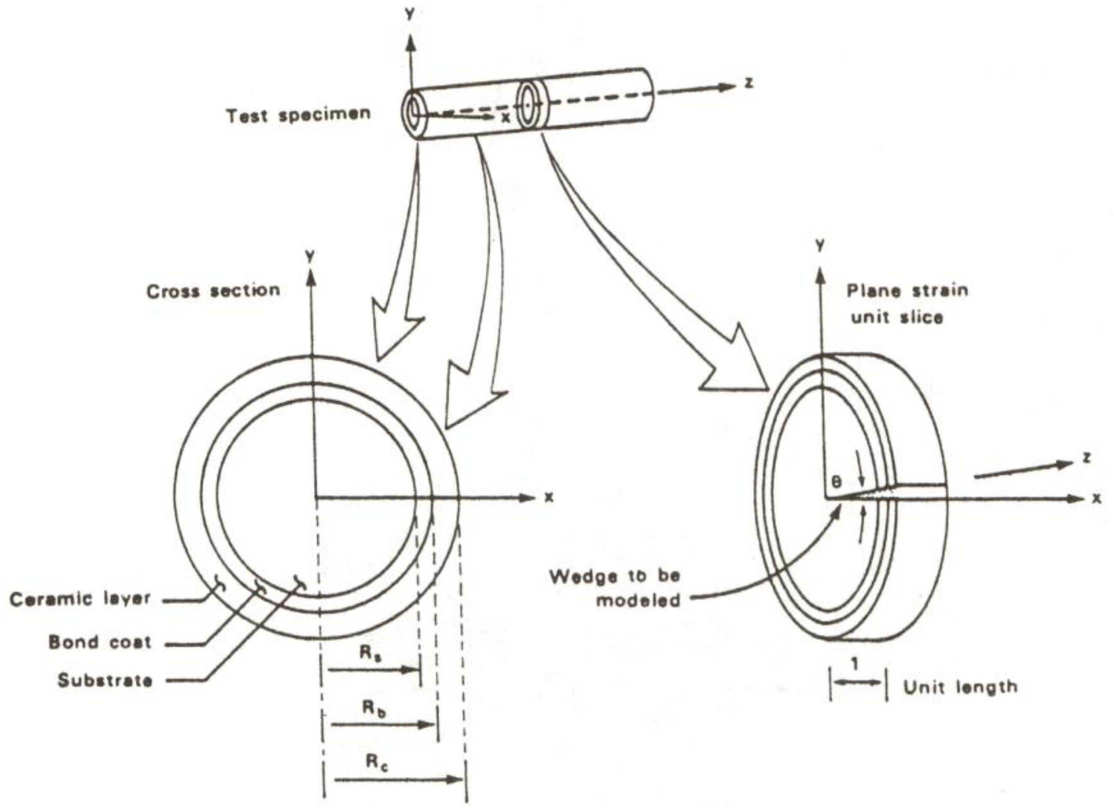
รูปที่ 2 แรงเค้นตามแนวรัศมีหน่วย psi. (เอกสารอ้างอิง 1)

โลหะส่วนบริเวณตัวของใบพัดซึ่งต้องกระทบกับความร้อนในการสันดาปนั้นให้เคลือบโลหะด้วยเซรามิกส์ ซึ่งการที่เซรามิกส์อยู่บริเวณผิวนอกของใบพัด จึงทนทานต่อสภาพการกัดกร่อน และปกป้องไม่ให้เนื้อใบพัดโลหะร้อนจนเกินไป นั่นคือ ประหยัดน้ำหล่อเย็นภายในไส้กลางของใบพัด ประโยชน์ที่ได้จากการเคลือบเซรามิกส์บนใบพัดนี้ คือ ทำให้เครื่องจักรไอพ่นทำงานได้อายุงานนานขึ้น ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพ ทำให้เพิ่มอุณหภูมิในการสันดาปได้อีก (นั่นหมายถึงเครื่องบินไอพ่นบินได้เร็วขึ้น) และทำให้ประหยัดน้ำมันเพราะสามารถใช้น้ำมันเกรดต่ำลงมาได้อีก โดยไม่ต้องกลัวเรื่องปัญหาการกัดกร่อน

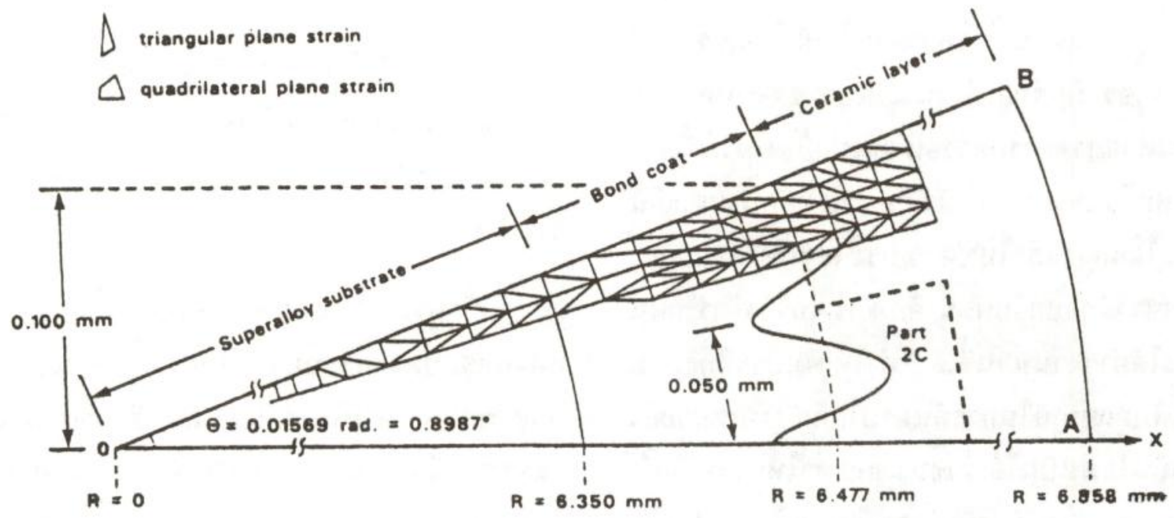
FEM ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์แรงเค้นที่เกิดขึ้นในการเคลือบใบพัดด้วยเซรามิกส์ (เอกสารอ้างอิง 2) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่องการเคลือบป้องกันความร้อน (Thermal Barrier Coatings หรือ TBC)

เพื่อที่จะให้การทำการวิเคราะห์ง่ายขึ้น และสอดคล้องกับการทดลองในห้องปฏิบัติการจึงใช้แท่งโลหะทรงกระบอกนำมาทดลองเคลือบด้วยเซรามิกส์แทนที่จะใช้ใบพัดจริง ๆ

เมื่อดูรูปที่ 3 จะแสดงให้เห็นถึงภาคตัดขวางของแท่งทดสอบทรงกระบอก โดยแกนกลางเป็นโลหะ Superalloy พวกไทเทเนียมผสม ซึ่งถูกเคลือบด้วยโลหะรองพื้น (Bond Coat) ที่เป็นโลหะผสมของนิเกิ้ล โครเมี่ยม อลูมินัม และยิทเทรี้ยม (yttrium) ส่วนผิวนอกสุดเคลือบด้วยเซรามิกส์ คือ เซอร์โคเนียม Zirconium หรือ Zr_2O ทำให้เสถียรด้วยส่วนผสมอีกเล็กน้อยของยิทเทรี้ยม (Y_2O_3) การเคลือบทำด้วยวิธีการที่เรียกว่า **การพ่นพอกด้วยพลาสม่า** (Plasma spray coating)



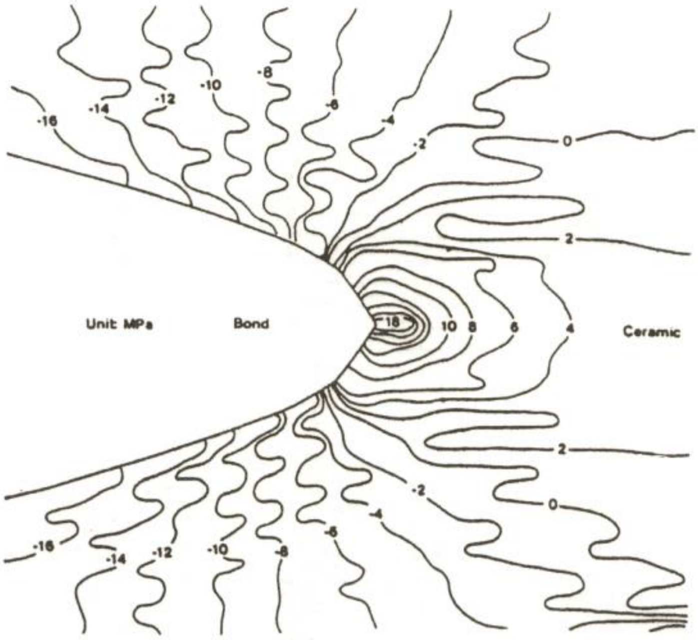
รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบทรงกระบอก แสดงให้เห็นถึงการเคลือบด้วยเซรามิกส์ และการทำ **FINITE ELEMENT MODEL** (เอกสารอ้างอิง 2)



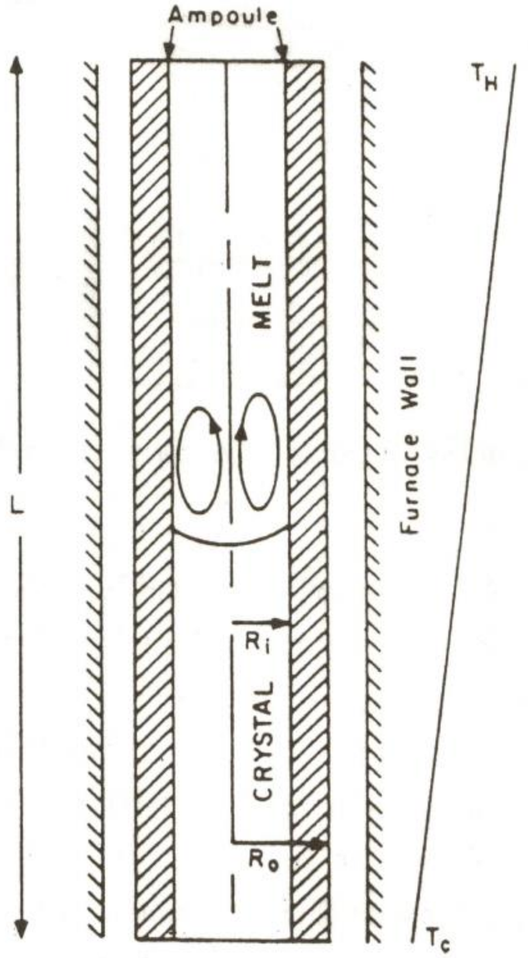
รูปที่ 4 แบบจำลองทาง **FINITE ELEMENT** ของรูปที่ 3 (เอกสารอ้างอิง 2)

เพื่อที่จะให้ประหยัดเวลาในคำนวณ เฉพาะเสี้ยวหนึ่งของภาคตัดขวาง ถูกนำมาทำเป็นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4

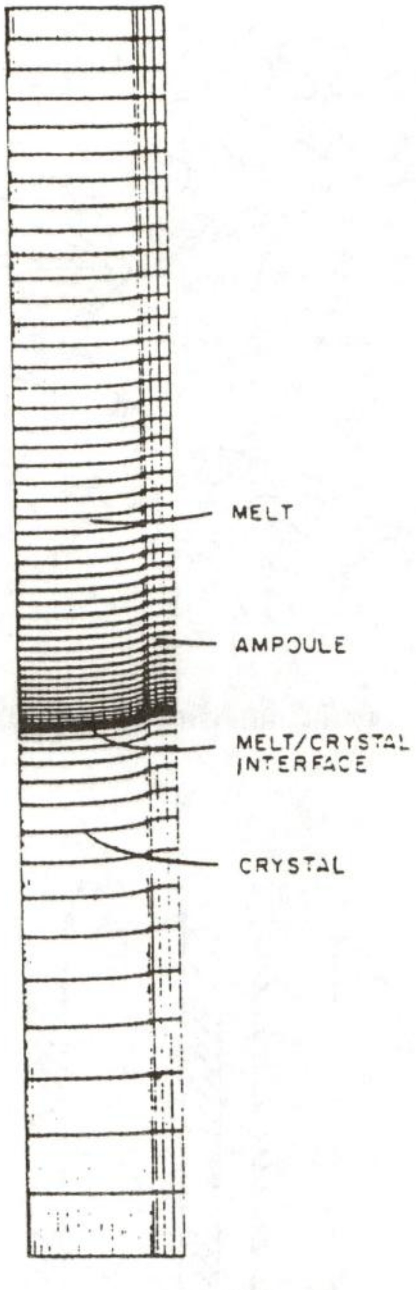
จะเห็นได้ว่าบริเวณรอยต่อระหว่างส่วนที่เป็น Bond coat และเซรามิกส์นั้นสมมติให้เป็นรูปคล้ายลูกคลื่นที่เป็น Sine wave อันเกิดจากการที่ตั้งใจ



รูปที่ 5 แรงเค้นในแนวรัศมีในเชื้อเซรามิกส์ (เอกสารอ้างอิง 2)



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงภาคตัดขวางของแท่งแก้วบรรจุ **Lithium Fluoride** (เอกสารอ้างอิง 3)



รูปที่ 7 ตัวอย่างของตาข่ายที่ใช้ในการทำ FEA ของระบบการเกิดผลัก (เอกสารอ้างอิง 3)

ทำเลียนแบบผิวของ Bond coat ซึ่งไม่เรียบ เพื่อว่าเมื่อพ่นเซรามิกส์ทับลงไปแล้วจะได้ติดแน่นขึ้น การวิจัยในส่วนนี้เป็นการดูผลของการที่ผิว Bond coat ไม่เรียบ จะทำให้เกิดแรงเค้นได้อย่างไร ในรูปที่ 5 เป็นแรงเค้นที่เกิดในแนวรัศมี (ในเนื้อเซรามิกส์) จะเห็นได้ว่าสูงสุดบริเวณปลายของลูกคลื่น ทำให้นักวิจัยสามารถใช้ผลจาก FEM มาวิจัยและผสมสูตรเซรามิกส์ใหม่เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ หรือปรับความหยาบ (ลักษณะของคลื่น) ของ Bond coat ฯลฯ จนกว่าแรงเค้นในเซรามิกส์จะน้อยกว่ากำลังดึงของเซรามิกส์ เพื่อที่จะได้ไม่เกิดการแตกหักในเซรามิกส์

2. การประยุกต์ใช้ FEM ในการหาแรงเค้นที่เกิดระหว่างการแข็งตัว (Solidification) ของผลึก

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงแท่งแก้ว หรือหลอดแก้ว (ampoule) ภายในบรรจุด้วย (Lithium Fluoride โดยตอนบนของหลอดแก้วนี้เป็นส่วนที่ได้รับความร้อน (Hot zone) Lithium Fluoride จะอยู่ในสถานะ

เป็นของเหลว ส่วนตอนล่างเป็นบริเวณที่เย็นกว่า (Cold zone) Lithium Fluoride จึงอยู่ในสถานะ เป็นของเหลว ส่วนตอนล่างเป็นบริเวณที่เย็นกว่า (Cold zone) Lithium Fluoride จึงอยู่ในสถานะ ของแข็ง โดยบริเวณผิวหน้าที่กั้นแบ่งระหว่างสถานะเป็นของเหลวกับของแข็งจะเห็นเป็นเส้นโค้ง (เอกสารอ้างอิง 3) เมื่อดึงหลอดแก้วนี้ลงมาในแนวดิ่งช้า ๆ จะได้ผลึกหรือของแข็งออกมาซึ่งก็คือส่วนที่อยู่ตอนล่างนั่นเอง

Lithium Fluoride ที่ดึงออกมานี้จะอยู่ในรูปของผลึกที่จะต้องปราศจากแรงเค้นเหลืออยู่และผลึกจัดรูปร่างได้สม่ำเสมอมีระเบียบจึงจะนำไปใช้งานได้ (เป็นกระจกที่ใช้กับอุปกรณ์เลเซอร์) การที่จะควบคุมให้ได้ผลึกที่ใช้งานได้นั้น จะต้องอยู่ที่การออกแบบระบบ (เรียกว่า ระบบ Bridgman crystal growth systems) เช่น ออกแบบอุณหภูมิบริเวณร้อนและเย็น ออกแบบเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดแก้ว ออกแบบความหนาของหลอดแก้ว ออกแบบให้การกระจายของอุณหภูมิในของเหลวสม่ำเสมอกันตลอดแนวผิวของผลึกเพื่อที่ว่าเวลาเย็นตัวจะได้เกิดผลึกที่รูปร่างเป็นระเบียบ ฯลฯ

รูปที่ 7 แสดงถึงแบบที่ใช้ในการทำ FEA (Finite Element Analysis) ส่วนบนคือ ของเหลว ส่วนล่าง คือ ผลึกที่แข็งตัวแล้ว

จากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ การคำนวณเรื่องการถ่ายเทความร้อน การหาการกระจายของอุณหภูมิในของเหลวทำให้สามารถออกแบบระบบการเกิดผลึกนี้ได้ในที่สุด

3. การคำนวณหาแรงเค้นและการบิดเบี้ยวของเหล็กดามกระดูก

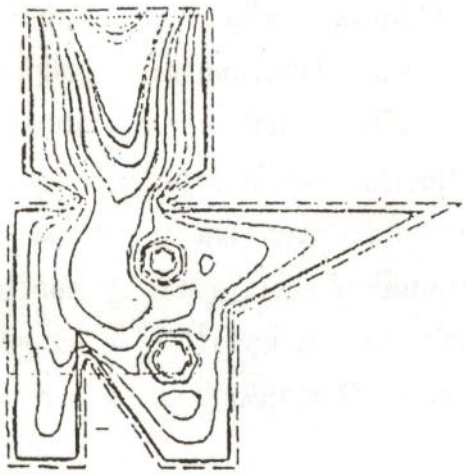
FEM ได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบเหล็กดามกระดูก โดยเฉพาะบริเวณขาท่อนล่าง หรือหน้าแข็ง ซึ่งลักษณะของเหล็กดามกระดูกนี้มักเป็นแผ่นบางยาว เจาะรูเพื่อให้ไขสกรูเข้าไปติดกับกระดูก ปัจจุบันวัสดุที่ใช้ทำ ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม (316 หรือ 316 L) ไทเทเนียม หรือในต่างประเทศใช้พวก Compasites ของเซรามิกส์ซึ่งมีราคาแพง โดยวัสดุที่จะนำมาใช้ต้องทนสภาพการกักกร่อนในร่างกายมนุษย์ได้เป็นอย่างดี

โดยอาศัย FEM ผู้วิจัยสามารถนำข้อมูลเกี่ยวกับแรงเค้นและการบิดเบี้ยวของเหล็กดามกระดูกไปออกแบบ หรือเลือกวัสดุที่ทนแรงกระทำที่เกิดขึ้นในกระดูกได้ แต่ปัญหาในปัจจุบันก็คือ เป็นการยากที่จะกำหนดขนาดและทิศทางของแรงที่กระทำต่อเหล็กดามกระดูก และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ Biomechanies ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ใช้มาตรฐานของชาวต่างประเทศซึ่งรูปร่างใหญ่โตผิดกับคนไทย รวมทั้งกิจวัตรประจำวันที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งจะมีผลต่อแรงกระทำบนกระดูกนั้นก็แตกต่างกัน เหล็กดามกระดูกที่ใช้ ปัจจุบันในเมืองไทย จึงมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับกระดูกของคนไทยจึงสมควรศึกษาวิจัยเหล็กดามกระดูกให้เหมาะสมกับคนไทย

4. การประยุกต์ใช้ FEM กับงานด้านการหล่อโลหะ

ปัจจุบันนี้มีซอฟแวร์มากมายที่สามารถใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ทั้งแม่พิมพ์โลหะและแม่พิมพ์พลาสติก หลักการของการออกแบบนี้เหมือนกับหลักการหล่อโลหะ คือ เกี่ยวข้องกับด้านการแข็งตัวของวัสดุ (Solidification) การระบายความร้อนของวัสดุ รวมถึงความสามารถในการไหลของวัสดุ และอื่น ๆ ตัวอย่างของซอฟแวร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบแม่พิมพ์ก็คือ MOLD FLOW ซึ่งใช้ FEM เข้ามาช่วยด้วย นอกจากนี้ยังมีซอฟแวร์ที่เกี่ยวข้องกับงานหล่อโลหะอื่น ๆ เช่น MAGMASOFT SOLSTAR AF Solid ProCAST Swift Phoenies และ Simulor Software ซึ่งมีทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ (เอกสารอ้างอิง 4)

การออกแบบและวิเคราะห์โดยอาศัยคอมพิวเตอร์นี้มีประโยชน์มาก เพราะเมื่อออกแบบและทดสอบดูว่าใช้ได้จริงแล้ว สามารถถ่ายทอดข้อมูลทางการออกแบบต่อไปยังอุปกรณ์ทำแม่พิมพ์ที่เป็น Computer Numerical Control หรือ CNC ได้สะดวก ผลที่ตามมา คือ ประกันคุณภาพของชิ้นงาน ผลิตชิ้นงาน



รูปที่ 8 แสดงผลการกระจายความร้อนในแบบหล่อ โดยใช้คอมพิวเตอร์ (เอกสารอ้างอิง 4)

ได้ทันเวลาและก่อให้เกิดกำไรแก่ผู้ประกอบการ

การศึกษาซอฟแวร์เพื่อมาใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์นี้มีมาเป็นเวลาร่วม 10 ปีแล้ว โดยการพยายามลดการลองผิดลองถูกของตัวแปรต่าง ๆ ลง เพื่อให้เกิดตำหนิในชิ้นงานน้อยที่สุด ควบคุมการหดตัวของวัสดุ ควบคุมรูพรุนต่าง ๆ การถ่ายเทความร้อน อัตราเร็วในการเติมวัสดุ ฯลฯ

รูปที่ 8 แสดงถึงการกระจายของความร้อนในแบบหล่อ

อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้ FEM ต้องพึงระลึกไว้เสมอว่า FEM นั้นเป็นการหาคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบจริงมากก็ตาม แต่คำตอบทั้งหมดจะต้องขึ้นกับการป้อนข้อมูลที่ถูกต้องด้วย เช่น ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมี ถ้าผู้ออกแบบใส่ข้อมูลยิ่งแม่นยำเท่าใด ความถูกต้องก็จะมีมากเท่านั้น ส่วนในการใช้ FEM เมื่อข้อมูลไม่เพียงพอนั้นสามารถกระทำได้ ในลักษณะ เช่น กำหนดให้ข้อมูลอยู่ในช่วงต่าง ๆ ดังนั้นคำตอบที่จะออกมาจะเป็นเฉพาะสำหรับข้อมูลในช่วงนั้น ๆ เมื่อผู้ออกแบบ ออกแบบผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะใช้คอมพิวเตอร์ออกแบบ เช่น AutoCAD เสร็จแล้ว ควรใช้ FEM ตรวจดูความแข็งแรงของโครงสร้าง ความเป็นไปได้ของผลิตภัณฑ์ในการผลิตหรือการใช้ ฯลฯ จากนั้น ข้อมูลจากคอมพิวเตอร์จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์อื่น เพื่อการผลิตต่อไป การถ่ายทอดข้อมูลตั้งแต่การออกแบบไปจนถึงการผลิตนี้จัดว่าเป็นการผลิตแบบ CIM หรือ Computer Integrated Manufacturing ได้

เอกสารอ้างอิง

1. C. Visser, S.Lien and R.J. Schaller, Application of Finite Element Analysis to Ceramic Components, **Journal of American Ceramic Society,** 58(1975) 131-135.
2. G.C.Chang, w. Phucharoen and R.A. Miller, Behavior of Thermal Barrier Coatings for Advanced Gas Turbine Blades, **Surface and Coatings Technology,** 30 (1987) 13-28.
3. P.M. Adornato and R.A. Brown, Convection and Segregation in Directional Solidification of Dilute and Non-Dilute Binary Alloys : Effects of Ampoule and Furnace Design, **Journal of Crystal Growth,** 80(1987) 15-190.
4. T.Bex, Solidification Modeling Reduces Casting Defects, **Modern Casting,** 3(1991) 23-25.