ME-NETT23
The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

CST-021112

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

การปรับปรุงเงื่อนไขการฉีดไดคาสติ้งในช่วง Pre-Filling

Optimization of Die Casting Injection Conditions during Pre-Filling Period

พีรกิตติ์ วิริยะรัตนศักดิ์[1*], NAGASAWA Osamu[2] และ ITAMURA Masayuki[3]

[1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
[2] Tokyo Rika Kogyo Co.,Ltd. Shirakawa, Fukushima, Japan 961-0835
[3] Nanocast Corporation, Mitaka Sangyo Plaza Annex Tokyo, Japan 181-0013
*E-mail: perakitv@mtec.or.th, โทรศัพท์: (662) 5646500, โทรสาร: (662) 5646370

บทคัดย่อ

กระบวนการไดคาสติ้ง (High Pressure Die Casting) หรือกระบวนการฉีดน้ำโลหะด้วยความดันสูงนั้นได้เข้ามามีบทบาทอย่างสูงสำหรับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่เป็นวัสดุอะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloy) ในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานที่ค่อนข้างซับซ้อนในเชิงปริมาณได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำ อีกทั้งยังมีผิวสำเร็จที่มีความเรียบสูง[1], [2] แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาโพรงอากาศ (Air Entrapment) ภายในชิ้นงานเป็นปัจจัยที่ฉุดให้ชิ้นงานมีคุณภาพที่ต่ำลง โดยสาเหตุของการเกิดโพรงอากาศภายในนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายประการ อาทิเช่น กระบวนการหลอมและการทรีทเมนต์น้ำโลหะไม่ได้มาตรฐาน และกระบวนการฉีดที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น ซึ่งหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดโพรงอากาศนั้นคือ เงื่อนไขการฉีดน้ำโลหะ (Injection Conditions) ซึ่งสามารถแบ่งการฉีดน้ำโลหะได้ออกเป็น 2 ช่วงใหญ่ๆ คือ การฉีดในส่วนของระบบจ่ายน้ำโลหะ (Pre-Filling) และการฉีดในส่วนของชิ้นงาน (Mold Filling) สำหรับการลดปริมาณโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในช่วงการฉีดในส่วนของชิ้นงานนั้นจะต้องทำการออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะให้เหมาะสมกับชิ้นงานนั้นๆ แต่สำหรับการลดปริมาณโพรงอากาศที่เกิดขึ้นในช่วงการฉีดในส่วนระบบจ่ายน้ำโลหะนั้น สามารถปรับปรุงให้มีความเหมาะสมได้จากการวิเคราะห์การไหล (Flow Analysis) โดยในบทความนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองการหล่อบนคอมพิวเตอร์ (Casting Simulation) ในการวิเคราะห์และปรับปรุงเงื่อนไขการฉีดน้ำโลหะภายในกระบอกสูบ (Shot Sleeve) ในช่วงการฉีดในระบบจ่ายน้ำโลหะ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมทั้งในแง่ของอัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ (Shot Sleeve Filled Ratio) และความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (Plunger Speed) เพื่อการผลิตชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมไดคาสติ้งที่มีคุณภาพสูงต่อไป

คำหลัก: กระบวนการไดคาสติ้ง (High Pressure Die Casting), อะลูมิเนียมผสม (Aluminium Alloy), โพรงอากาศ (Air Entrapment), อัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ (Shot Sleeve Filled Ratio)

Abstract

Nowadays, high pressure die casting plays a major role in automobile parts production especially, aluminum alloy because of the excellent dimensional accuracy with cost effectiveness and the smooth surfaces. However, air entrapment can lead to quality decreasing in work piece. Air entrapment can be occurred in many cases for example, poor melting and treatment process and inappropriate injection

process etc. One of major factors caused an air entrapment problem is injection conditions which can be divided into 2 sections; pre-filling injection and mold filling injection. Air entrapment reduction during pre-filling injection process requires the most appropriate designing for specific pre-filling injection parts; on the other hand, it requires an accuracy of flow analysis to reduce air entrapment during mold filling injection process.

The aim of this article is to present casting simulation to optimize of shot sleeve injection conditions during pre-filling period. The result will show appropriate conditions either shot sleeve filled ratio and plunger speed for producing high quality of aluminum alloy die casting.

***Keywords**:* High Pressure Die Casting, Aluminium Alloy, Air Entrapment, Shot Sleeve Filled Ratio

1. บทนำ

กระบวนการขึ้นรูปโลหะที่มีมาตั้งแต่โบราณและยังนิยมใช้เพื่อผลิตชิ้นงานในปัจจุบันกระบวนการหนึ่งที่สามารถกล่าวได้คือ กระบวนการหล่อโลหะ (Casting Process) โดยเฉพาะกระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อทราย (Sand Casting) ซึ่งยังคงมีบทบาทอย่างต่อเนื่องสำหรับการผลิตชิ้นงานหล่อในปัจจุบัน [2] แต่เนื่องจากปัญหาด้านมลภาวะที่เกิดขึ้นภายในสถานประกอบการ ประกอบกับรอบการผลิตซึ่งต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างสูง และต้องทำลายแบบหล่อทรายทุกครั้งเพื่อให้ได้ชิ้นงานหล่อออกมา กระบวนการหล่อโลหะด้วยแบบหล่อถาวร (Permanent Mold Casting) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น เพื่อลดข้อบกพร่องดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตาม จากสภาวะเศรษฐกิจที่มีการแข่งขันอย่างสูงในปัจจุบัน ทำให้ต้นทุนการผลิตเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างสูงต่อการเลือกกระบวนการผลิต และในจำนวนกระบวนการหล่อโลหะที่มีในปัจจุบันนั้น สามารถกล่าวได้ว่า กระบวนการหล่ออัดฉีดด้วยความดันสูง (High Pressure Die Casting)[1] มีข้อได้เปรียบทั้งในแง่ของต้นทุนการผลิตที่ต่ำ และผิวสำเร็จของชิ้นงาน (Surface Quality) ที่มีความเรียบสูงมากกว่ากระบวนการหล่อโลหะวิธีอื่น ซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการดังกล่าวออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ กระบวนการไดคาสติ้งแบบโคลด์แชมเบ อร์ (Cold Chamber Die Casting) และกระบวนการไดคาสติ้งแบบฮอตแชมเบอร์ (Hot Chamber Die Casting) ซึ่งทั้งสองกระบวนการมีความแตกต่างตรงที่กระบวนการไดคาสติ้งแบบโคลด์แชมเบอร์นั้นจะใช้กระบวยตักน้ำโลหะ (Ladle) จากเตาหลอมหรือเตาอุ่น (Melting and Holding Furnace) เพื่อเทน้ำโลหะลงสู่กระบอกสูบ (Shot Sleeve) แต่กระบวนการไดคาสติ้งแบบฮอตแชมเบอร์จะใช้กลไกของการดันน้ำโลหะเข้าสู่กระบอกสูบโดยตรง ทว่า กระบวนการไดคาสติ้งแบบโคลด์แชมเบอร์มีข้อได้เปรียบในด้านการจัดการที่ซับซ้อนน้อยกว่า จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการผลิตชิ้นงานหล่อโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโลหะผสมอะลูมิเนียมซึ่งมีบทบาทที่สำคัญในฐานะโลหะผสมที่มีความแข็งแรง แต่ในขณะเดียวกันมีน้ำหนักที่เบากว่าโลหะจำพวกเหล็กถึง 1 ใน 3 แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการไดคาสติ้งแบบโคลด์แชมเบอร์นั้นมีข้อด้อยในด้านการเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงานที่ค่อนข้างสูง โดยมีสาเหตุอยู่ด้วยกันหลายประการ เช่น กระบวนการหลอมและการทรีทเมนต์น้ำโลหะไม่ได้มาตรฐาน รวมถึงกระบวนการฉีดที่ไม่เหมาะสม เป็นต้น สำหรับสาเหตุที่มาจากเงื่อนไขการฉีดน้ำโลหะ (Injection Conditions) โดยเฉพาะการฉีดในส่วนของระบบจ่ายน้ำโลหะ (Pre-Filling) นั้นสามารถปรับปรุงได้ด้วยการจำลองการไหลของน้ำโลหะ (Flow Analysis) เนื่องจากเครื่องฉีดไดคาสติ้งทุกขนาดกำลังปิดแม่พิมพ์จะต้องใช้กระบอกสูบ (Shot Sleeve) ซึ่งเป็นมาตรฐานร่วมกัน

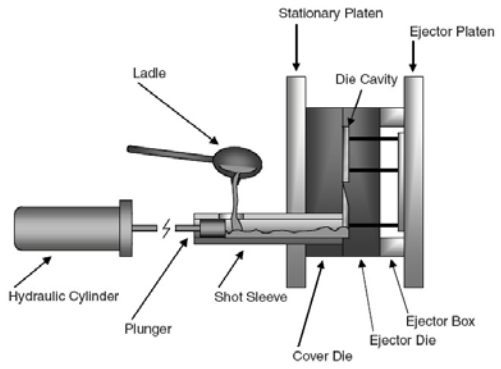
2. วัตถุประสงค์

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองการหล่อบนคอมพิวเตอร์ (Casting Simulation)

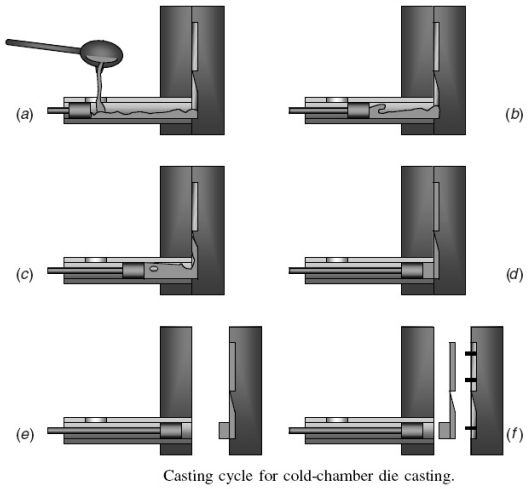
ในการ วิเคราะห์ และปรับปรุง เงื่อนไขการฉีดน้ำโลหะภายในกระบอกสูบ (Shot Sleeve) ในช่วงการฉีดในระบบจ่ายน้ำโลหะ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมทั้งในแง่ของอัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ (Shot Sleeve Filled Ratio) และความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (Plunger Speed) เพื่อการผลิตชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมไดคาสติ้งที่มีคุณภาพสูงต่อไป

3. กระบวนการไดคาสติ้ง

กระบวนการไดคาสติ้งนั้นประกอบขึ้นด้วยแม่พิมพ์ (Die) และแผ่นยึดแม่พิมพ์ (Platen) ที่อยู่ทั้งสองด้านของแม่พิมพ์ จากแม่พิมพ์ฝั่งอยู่กับที่ (Fixed Die) จะประกบเข้ากับกระบอกสูบ (Shot Sleeve) ซึ่งจะมีลูกสูบ (Plunger) ที่ทำหน้าที่ดันน้ำโลหะเข้าสู่แควิตี้ของแม่พิมพ์ ด้วยกำลังจากถังเก็บความดัน (Accumulator) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องฉีดไดคาสติ้งแบบโคลด์แชมเบอร์[1]



รูปที่ 2 กระบวนการฉีดไดคาสติ้ง[1]

รูปที่ 2 แสดงถึงกลไกการทำงานของกระบวนการไดคาสติ้ง โดยมีลำดับดังต่อไปนี้

(a) ตักน้ำโลหะลงสู่กระบอกสูบ

(b) ลูกสูบเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็วต่ำ (Slow Shot Speed) เพื่อดันน้ำโลหะเข้าสู่ระบบจ่ายน้ำโลหะ (Gating System)

(c) ลูกสูบเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็วสูง (Fast Shot Speed) เพื่อฉีดน้ำโลหะเข้าสู่แควิตี้ของแม่พิมพ์

(d) ความดันจากถังเก็บความดัน (Accumulator) ถ่ายผ่านลูกสูบไปยังน้ำโลหะที่อยู่ในแควิตี้ของแม่พิมพ์

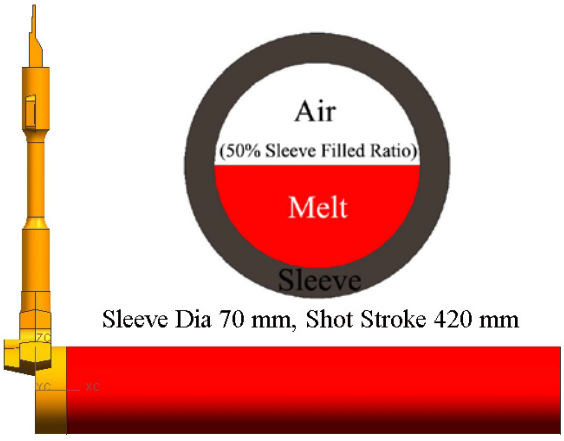
(e) แม่พิมพ์เปิดและชิ้นงานติดไปกับแม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่ได้ (Moving Die)

(f) เข็มกระทุ้ง (Ejector Pin) ทำหน้าที่ผลักชิ้นงานออกจากแควิตี้ของแม่พิมพ์

จากกลไกการทำงานข้างต้น จะเห็นได้ว่าโพรงอากาศที่มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของลูกสูบตาม (b) นั้น ไม่ได้แปรผันต่อการออกแบบระบบจ่ายน้ำโลหะ หรือรูปทรงของชิ้นงานแต่อย่างใด ซึ่งหากสามารถเข้าใจพฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะในช่วงดังกล่าวได้แล้วจะสามารถลดโพรงอากาศที่เกิดขึ้นได้

4. แบบจำลองสำหรับการคำนวณและค่าเงื่อนไขขอบเขต

4.1 แบบจำลอง 3 มิติ



รูปที่ 3 แบบจำลอง 3 มิติของระบบจ่ายน้ำโลหะ

แบบจำลองของระบบการฉีดน้ำโลหะแสดงไว้ดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยกระบอกสูบ (Shot Sleeve)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มม. ความยาว 420 มม. ทางวิ่งน้ำโลหะ (Gating System) และชิ้นงาน

แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกระบอกสูบมีลักษณะที่สมมาตรกัน ดังนั้น การคำนวณการไหลของน้ำโลหะในหัวข้อวิจัยนี้จึงกำหนดใช้แบบจำลอง 2 มิติของกระบอกสูบ ในการคำนวณ ด้วยการกำหนดให้ขนาดของ Mesh สำหรับการคำนวณการไหลของน้ำโลหะภายในกระบอกสูบและการคำนวณการแข็งตัวของน้ำโลหะภายในกระบอกสูบมีขนาด 1.0 มม. และ 0.2 มม. ตามลำดับ ซึ่งจำนวน Mesh ทั้งสิ้น 156,897 Meshes และ 1,764,028 Meshes ตามลำดับ

4.2 อุปกรณ์คอมพิวเตอร์

ฮาร์ดแวร์ : Intel® Core™2 CPU T7400 @ 2.16GHz, 2.00 GB RAM

ซอฟต์แวร์ : ADSTEFAN Version 9.0 (FDM, SOLA-VOF)

4.3 ค่าเงื่อนไขขอบเขต

ตารางที่ 1 ค่าเงื่อนไขขอบเขต

น้ำโลหะ (Melt)		กระบอกสูบ (Sleeve)	
วัสดุ	อุณหภูมิตั้งต้น	วัสดุ	อุณหภูมิตั้งต้น
ADC12	630C	SKD61	200C
อัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ (Shot Sleeve Filled Ratio)			10-100 (%)
ความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (Plunger Speed)			0.1-1.0 (m/s)

หมายเหตุ

(1) การวิเคราะห์การฉีดน้ำโลหะภายในกระบอกสูบ (Shot Sleeve) จะพิจารณาเฉพาะการไหลของน้ำโลหะเท่านั้น โดยไม่คำนวณถึงการถ่ายเทความร้อน

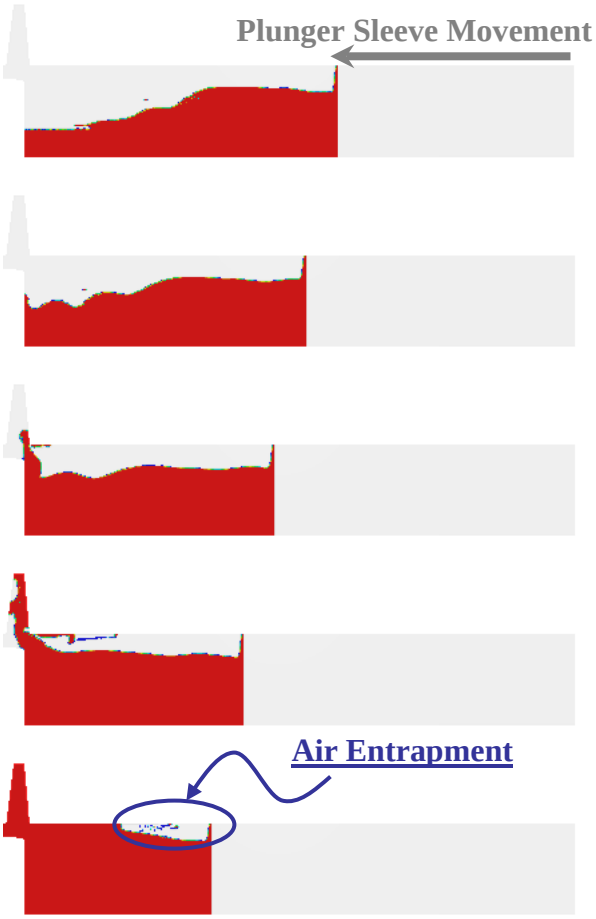
(2) ค่าคุณสมบัติเชิงกายภาพของน้ำโลหะและกระบอกสูบใช้ตามฐานข้อมูลในโปรแกรม ADSTEFAN Version 9.0

4.4 วิธีการคำนวณ

การวิเคราะห์เริ่มต้นจากอัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ (Shot Sleeve Filled Ratio) ที่ 10% ของความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (Plunger Speed) ตั้งแต่ 0.1 m/s จนถึง 1.0 m/s และวิเคราะห์ด้วยรูปแบบเดียวกันนี้กับอัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ (Shot Sleeve Filled Ratio) ที่ 20% จนถึง 100%

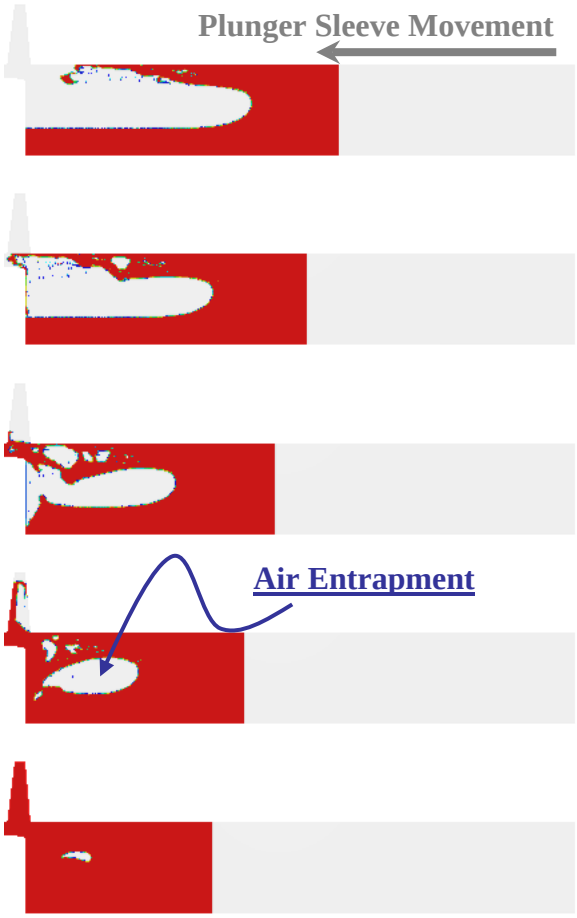
5. ผลการจำลองการหล่อบนคอมพิวเตอร์

5.1 อิทธิพลของอัตราการเติมเต็มกระบอกสูบและความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (กรณีเกิดกับดักอากาศ)



รูปที่ 4 ตัวอย่างการเกิดกับดักอากาศ (ก) อัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ 30% ความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ 0.5m/s

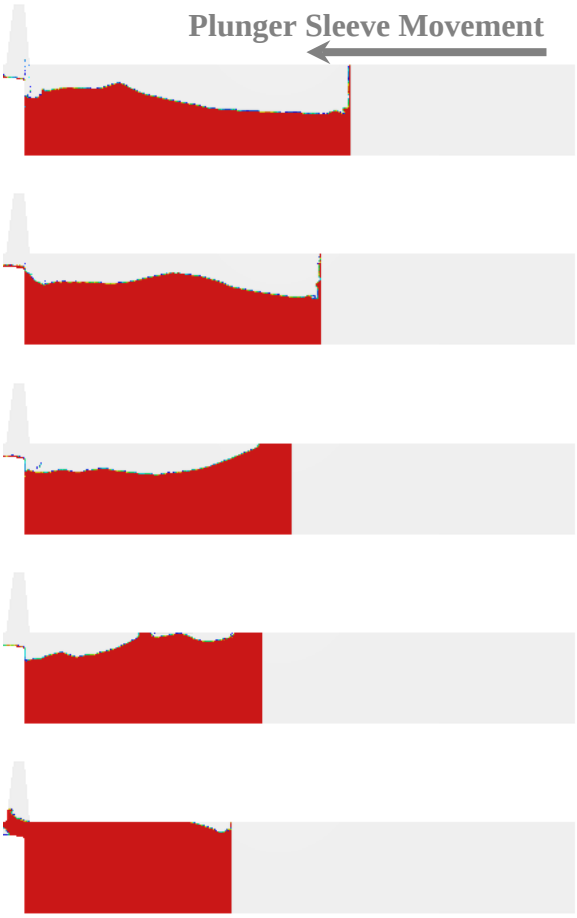
จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า การไหลของน้ำโลหะในช่วงที่ลูกสูบเริ่มเคลื่อนที่มีลักษณะเชิงระนาบ แต่อย่างไรก็ตาม ได้เกิดกับดักอากาศ (Air Entrapment) ขึ้นภายในกระบอกสูบ ในช่วงท้ายสุดของการฉีดในส่วนระบบจ่ายน้ำโลหะ ซึ่งอากาศที่ตกค้างอยู่ภายในกระบอกสูบจะผสมอยู่ภายในชิ้นงานในท้ายที่สุด จึงส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้ลดต่ำลง และเป็นสาเหตุทำให้เกิดข้อบกพร่องอาการบวม (Blister Defect) เมื่อนำชิ้นงานดังกล่าวไปใช้ในที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 5 ตัวอย่างการเกิดกับดักอากาศ (ข)
อัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ 30%
ความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ 1.0m/s

จากรูปที่ 5 ซึ่งเป็นตัวอย่างของการเกิดกับดักอากาศอีกประเภทหนึ่ง จะเห็นได้ว่า ณ อัตราการเติมเต็มกระบอกสูบที่ 30% เท่ากัน แต่เพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบเป็น 1.0 m/s จะทำให้การไหลของน้ำโลหะในช่วงที่ลูกสูบเริ่มเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งน้ำโลหะที่ไหลแนบกับผนังกระบอกสูบด้านบนนั้นอาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็นการไหลด้วยอิทธิพลของแรงเฉื่อย (Inertia Control) ซึ่งอากาศที่ตกค้างอยู่ภายในกระบอกสูบเช่นนี้จะผสมอยู่ภายในชิ้นงานในท้ายที่สุด และส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ได้ลดต่ำลงเช่นเดียวกัน

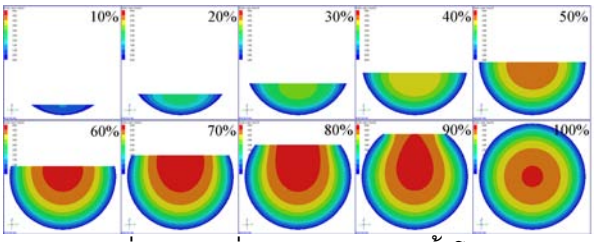
5.2 อิทธิพลของอัตราการเติมเต็มกระบอกสูบและความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (กรณีการไหลเชิงระนาบ)



รูปที่ 6 ตัวอย่างการไหลของน้ำโลหะเชิงระนาบ
อัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ 60%
ความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ 0.2m/s

ในทางกลับกัน รูปที่ 6 แสดงถึงพฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะเชิงระนาบ (Laminar Flow) โดยตลอดระยะเวลาที่ลูกสูบเคลื่อนที่จะไม่ก่อให้เกิดอากาศตกค้างอยู่ภายในน้ำโลหะ

5.3 การแข็งตัวของน้ำโลหะภายในกระบอกสูบ

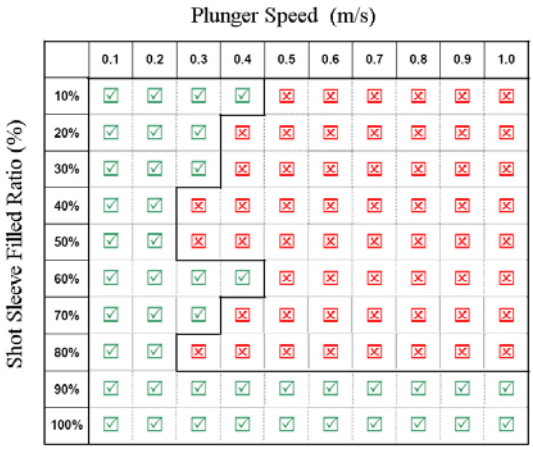


รูปที่ 7 เวลาเริ่มการแข็งตัวของน้ำโลหะ

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าอัตราการเติมเต็มกระบอกสูบส่งผลต่อการเย็นตัวและการเกิดชั้นของแข็ง (Chilled Layer) ภายในกระบอกสูบ ซึ่งหากอัตรา

ดังกล่าวอยู่ในระดับสูง จะส่งผลให้เวลาในการเย็นตัวของน้ำโลหะสูงขึ้น

6. สรุปและข้อเสนอแนะ



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมเต็มกระบอกสูบและความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ ต่อการเกิดกับดักอากาศ

เมื่อนำผลการคำนวณการไหลของน้ำโลหะที่มีอัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ (Shot Sleeve Filled Ratio) ตั้งแต่ 10%-100% และการคำนวณการไหลของน้ำโลหะจาก ความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (Plunger Speed) ตั้งแต่ 0.1 m/s จนถึง 1.0 m/s แล้วนำมาวิเคราะห์ถึงอิทธิพลต่อการเกิดกับดักอากาศ (Air Entrapment) แล้วจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการเติมเต็มกระบอกสูบ (Shot Sleeve Filled Ratio) และความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบ (Plunger Speed) ต่อการเกิดกับดักอากาศ (Air Entrapment) ดังรูปที่ 8 โดยที่บริเวณพื้นที่สีเขียวเป็นบริเวณที่ค่อนข้างปลอดภัยจากการเกิดกับดักอากาศ และบริเวณสีแดงเป็นบริเวณอันตรายที่ง่ายต่อการเกิดการไหลของน้ำโลหะอย่างปั่นป่วนภายในกระบอกสูบ

และจากความรู้ที่ได้เมื่อนำมาสังเคราะห์รวมกับผลวิเคราะห์การเย็นตัวของน้ำโลหะภายในกระบอกสูบแล้ว ทำให้ทราบว่าการกำหนดค่าความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกสูบประมาณ 0.3m/s-0.4m/s โดยให้อัตราการ เติมเต็มกระบอกสูบที่ 60%-70% จะทำให้การไหลของน้ำโลหะภายในกระบอกสูบในช่วงการฉีดในส่วนระบบจ่ายน้ำโลหะนั้นมีประสิทธิภาพสูงสุด กล่าวคือ สามารถลดการเกิดชั้นของแข็ง (Chilled Layer) ของน้ำโลหะบริเวณผิวกระบอกสูบเนื่องจากความร้อนสะสมของน้ำโลหะในระดับสูง รวมทั้งการเกิดกับดักอากา ศในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้สามารถผลิตชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมไดคาสติ้งที่มีคุณภาพสูงด้วยรอบเวลาการผลิต (Cycle Time) ที่ต่ำลง

อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ที่ได้ดังรูปที่ 8 อยู่บนพื้นฐานการคำนวณด้วยอะลูมิเนียมผสมเกรด ADC12 และกระบอกสูบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มม. ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวให้เหมาะสมกับวัสดุและขนาดของกระบอกสูบที่เปลี่ยนแปลงไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ร.ศ.ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ และศ.ปราโมทย์ เดชะอำไพ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่สนับสนุนการวิจัย มาโดยตลอด และขอขอบคุณ Prof.ANZAI Koichi จาก Tohoku University และ Dr.ITAMURA Masayuki จาก Nanocast Corporation พร้อมทั้ง Mr.KIKUCHI Masao และ Mr.NAGASAWA Osamu จาก Tokyo Rika Co.,Ltd ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการไดคาสติ้ง รวมถึง Dr.TAKAHASHI Isamu จาก Ibaraki Information Serivce Co.,Ltd. ที่เอื้อเฟื้อโปรแกรมจำลองการหล่อบนคอมพิวเตอร์ (ADSTEFAN) สำหรับใช้ในการศึกษาวิจัย และในท้ายที่สุดต้องขอขอบพระคุณ Prof.NIYAMA Eisuke ที่ให้คำแนะนำและแง่คิดในการทำงานมาโดยตลอด

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Doehler, H., “Art of Apparatus for Casting Fluid Metal, “United States Patent 973,483, United States Patent and Trademark Office, Washington, D.C., 25, October 1910.

[2] Japan Die Casting Association (2003). What is die casting? available online : http://www.diecasting.or.jp