การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22
15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

การพัฒนากระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็ง

Development of Semi-Solid Die Casting

พีรกิตติ์ วิริยะรัตนศักดิ์[1*] KIKUCHI Masao[2] MAEDA Takuma[2] ITAMURA Masayuki[2] Prof.ANZAI Koichi[3]
และ Prof.NIYAMA Eisuke[4]

[1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน คลองหนึ่ง คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
โทร 0-2564-6500 โทรสาร 0-2564-6370 *อีเมล์ perakitv@mtec.or.th

[2] Nanocast Corporation, Mitaka Sangyo Plaza Annex, Tokyo, Japan 181-0013

[3] Department of Metallurgical Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai, Japan 980-8579

[4] NIT, Hitachinaka-shi, Ichige, Ibaraki, Japan 312-0033

บทคัดย่อ

จากปัญหามลภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน ทำให้เกิดมาตรการกำหนดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์แล้ว สิ่งที่สามารถกระทำได้ คือการลดน้ำหนักของรถยนต์เพื่อลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนใช้วัสดุอะลูมิเนียมผสมแทนวัสดุจำพวกเหล็กในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ นอกจากนี้ท่ามกลางภาวะที่มีการแข่งขันเชิงธุรกิจอย่างรุนแรง การลดต้นทุนการผลิตพร้อมทั้งการยกระดับคุณภาพของชิ้นส่วนยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เลือกใช้กระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งหรือแบบกึ่งของเหลว (Semi-Solid, Semi-Liquid Die Casting) สำหรับการผลิตชิ้นส่วนอะลูมิเนียมผสมที่ต้องการคุณภาพในระดับสูง แต่อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งที่มีอยู่ในปัจจุบัน ยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้ กล่าวคือ กระบวนการผลิตสเลอรี่กึ่งของแข็ง (Semi-Solid Slurry) มีความซับซ้อนและใช้เวลามากกว่ารอบการผลิตชิ้นงานไดคาสติ้ง อีกทั้งเครื่องจักรอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาสูงมาก รวมทั้งยังจำกัดเฉพาะวัสดุอะลูมิเนียมผสมบางจำพวกเท่านั้น[1)–8)] ด้วยเหตุผลดังกล่าว คณะผู้วิจัยฯ จึงได้คิดค้นพัฒนากระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งวิธีใหม่ โดยใช้หลักการตีวนของแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro-magnetic stirring) ช่วยในการผลิตสเลอรี่กึ่งของแข็งในชื่อ “Nanocast Method” ซึ่งทำให้ได้ขนาดของผลึกปฐมภูมิที่ต่ำกว่า 100 ไมครอน และมีการกระจายตัวของเกรนที่สม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพภายในและมีคุณสมบัติเชิงกลที่สูงกว่ากระบวนการผลิตไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งวิธีอื่นด้วยต้นทุนการผลิตที่ลดลง

คำหลัก

กระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของเหลว กระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็ง การตีวนของแม่เหล็กไฟฟ้า สเลอรี่กึ่งของแข็ง สัดส่วนของของแข็ง โครงสร้างจุลภาคที่ละเอียด ความสมบูรณ์ของเนื้อภายใน

Abstract

Global warming is an extremely severe problem facing the world today. Its effects and causes have been on the rise and people need to do something about it before the problem gets any worse. From that reason, the trend of technology development for automobile makers and automotive part manufacturers are to light weight vehicle for minimum fuel consumption such as changing iron material to aluminium alloy. In addition, in order to reduce a production cost and increase a quality of parts most of automotive part manufacturers choose Semi-Solid or Semi-Liquid Die Casting for producing a high quality of aluminium parts. However, there are some disadvantages of those techniques comprising of process complicated, time consuming, machinery high-price, and material constraints.[1)-8)] Therefore, team researcher had developed quick and easy semi-solid slurry manufacturing using electro-magnetic stirring named as “Nanocast method” which provided a product internal quality and a mechanical property higher than other conventional Semi-Solid Die Casting method with cost reduction.

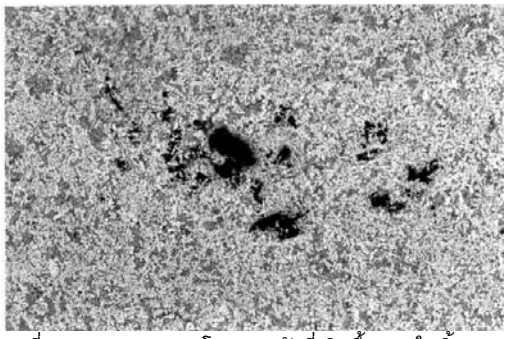
Key words

Semi-liquid die casting, Thixo-casting, Semi-solid die casting, Rheo-casting, Electro-magnetic stirring, Semi-solid slurry, Nanocast, Fraction of solid, Refined grain, Soundness

1. บทนำ

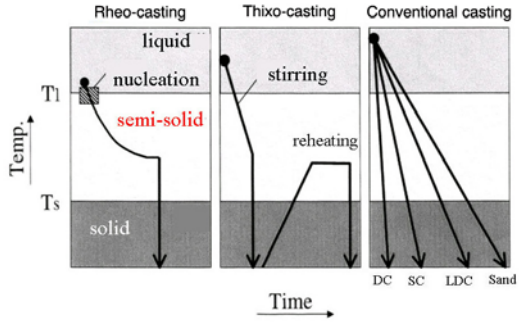
รถยนต์ที่ถูกผลิตขึ้นในปัจจุบันมีแนวโน้มของการเปลี่ยนมาใช้วัสดุจำพวกอะลูมิเนียมผสมเพื่อลดน้ำหนัก และช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน โดยในปัจจุบันมีสัดส่วนการใช้อะลูมิเนียมผสมเพิ่มมากขึ้นถึง

ร้อยละ 7-10 ต่อปี ในขณะเดียวกัน มีการคาดการณ์ถึงแนวโน้มการใช้ชิ้นส่วนยานยนต์ที่ผลิตจากวัสดุจำพวกแมกนีเซียมผสมมากถึงร้อยละ 6 ภายในปี พ.ศ. 2553 สำหรับกระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนยานยนต์ที่เป็นอะลูมิเนียมผสมนั้น กระบวนการไดคาสติ้งแบบธรรมดา (Conventional die casting) เป็นกระบวนการที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ด้วยราคาต้นทุนที่ต่ำภายในระยะรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตาม ชิ้นส่วนที่ผลิตด้วยกระบวนการไดคาสติ้งแบบธรรมดาจะมีข้อด้อยในด้านคุณภาพภายในที่ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ เกิดฟองอากาศและโพรงหดตัวขึ้นภายใน ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นต้น ดังนั้น จึงมีการคิดค้นกระบวนการไดคาสติ้งแบบพิเศษ ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการสควีซแคสติ้ง (Squeeze casting) กระบวนการไดคาสติ้งแบบสุญญากาศ (High vacuum die casting) รวมถึงกระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งและกึ่งของเหลว (Semi-liquid, Semi-solid die casting) ขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์คุณภาพสูง แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านการผลิตรวมถึงราคาต้นทุนการผลิตที่สูงยังเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้ไม่สามารถนำเอาเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริงในสถานประกอบการ



รูปที่ 1 ฟองอากาศและโพรงหดตัวที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน

กระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็ง (Semi-solid die casting) เป็นกรรมวิธีหล่อโลหะประเภทหนึ่งโดยใช้วัตถุดิบของโลหะในสถานะกึ่งของแข็ง จึงทำให้อัตราการหดตัวของโลหะภายในแม่พิมพ์มีค่าต่ำ และเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะในสถานะกึ่งของแข็งมีค่าที่ต่ำกว่า จึงทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ยาวนานขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ในการผลิตสเลอรี่กึ่งของแข็งรวมทั้งเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันยังมีราคาที่สูง จึงไม่เหมาะสำหรับบริษัทผู้ผลิตขนาดกลางและขนาดย่อม



รูปที่ 2 อัตราการเย็นตัวของโลหะในกระบวนการหล่อแบบต่าง ๆ[9)]

โดยกระบวนการผลิตสเลอรี่ของโลหะยังสามารถแบ่งออกได้เป็นกระบวนการผลิตสเลอรี่แบบกึ่งของเหลว (Semi-liquid method) และกระบวนการผลิตสเลอรี่แบบกึ่งของแข็ง (Semi-solid method) โดยที่กระบวนการไดคาสติ้ง แบบกึ่งของเหลวซึ่งรู้จักกันทั่วไปในชื่อของ Thixo-casting และกระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งซึ่งรู้จักกันทั่วไปในชื่อของ Rheo-casting ซึ่งทั้งสองกระบวนการแตกต่างกันที่ความซับซ้อนในการผลิตสเลอรี่โดยสามารถอธิบาย ได้ตามกราฟอัตราการเย็นตัวดังแสดงในรูปที่ 2 แต่อย่างไรก็ตาม ทั้งสองกระบวนการยังต้องการเครื่องจักรอุปกรณ์เฉพาะแบบและมีราคาแพง

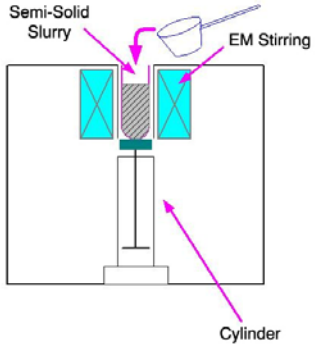
ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนากระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งอย่างง่ายให้มีความเหมาะสมและสามารถนำไปใช้ได้จริงสำหรับการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เชิงปริมาณ

2. วัตถุประสงค์

เพื่อให้ผู้ประกอบการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ขนาดกลางและขนาดย่อมเข้าถึงเทคโนโลยีไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็ง จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนากระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งให้มีราคาถูกลงและต้องใช้งานได้จริงในการผลิตเชิงปริมาณ โดยเน้นที่อะลูมิเนียมผสมและแมกนีเซียมผสม ซึ่งถือเป็นโลหะที่จะมีบทบาทในทางอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต สำหรับรายละเอียดของงานวิจัยฯ จะไม่เฉพาะเพียงทำให้เกิดสเลอรี่กึ่งของแข็งเท่านั้น แต่ยังจะต้องพัฒนาให้ได้โครงสร้างจุลภาคแบบผลึกกลมขนาดละเอียดเพื่อคุณสมบัติเชิงกลที่สูง รวมถึงเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งนี้ด้วย

3. กระบวนการผลิตสเลอรี่กึ่งของแข็งด้วยวิธี Nanocast

การผลิตสเลอรี่กึ่งของแข็งด้วยวิธี Nanocast นี้อาศัยพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าช่วยให้เกิดโครงสร้างผลึกปฐมภูมิรูปทรงกลมระหว่างการเย็นตัวของโลหะผสม ดังแสดงในรูปที่ 3 กล่าวคือ ดึงความร้อนออกจากโลหะผสมให้อยู่ในช่วงระหว่าง อุณหภูมิของการกลายเป็นของเหลว (Liquidus temperature) และอุณหภูมิของการกลายเป็นของแข็ง (Solidus temperature) หรือในอีกนัยหนึ่ง ลดอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Mushy zone) ในขณะเดียวกันพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจะช่วยให้ผลึกปฐมภูมิที่เกิดขึ้นมาไม่เจริญเติบโตเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendritic structure) แต่อยู่ในรูปทรงกลม



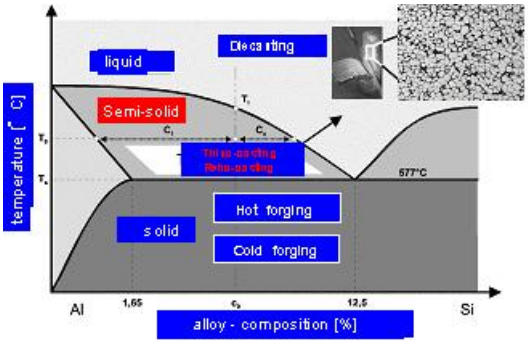
รูปที่ 3 อุปกรณ์ผลิตสเลอรี่กึ่งของแข็งด้วยวิธี Nanocast

4. กระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งประยุกต์วิธี Nanocast

สำหรับเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งวิธี Nanocast นี้ ประกอบขึ้นด้วยเครื่องไดคาสติ้งแบบธรรมดาขนาด 250 ตันที่ผ่านการดัดแปลงให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งและอุปกรณ์สำหรับการผลิตสเลอรี่กึ่งของแข็งวิธี Nanocast ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 ม.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4

รูปที่ 4 เครื่องฉีดไดคาสติ้งที่ได้รับการดัดแปลงแล้ว

ในส่วนของวัสดุสำหรับงานวิจัยฯ ในครั้งนี้เลือกเป็นอะลูมิเนียมผสมเกรด AC4C ซึ่งมีค่าส่วนผสมทางเคมีและค่าคุณสมบัติที่สำคัญดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (อ้างอิงจากมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น) และมีแผนภูมิเฟสสมดุลดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภูมิเฟสสมดุลของโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิกอน

ตารางที่ 1 ค่าส่วนผสมทางเคมีของ AC4C

Element	Wt%	Element	Wt%
Mg	0.2-0.45	Si	6.5-7.5
Cr	≤ 0.1	Fe	≤ 0.55
Cu	≤ 0.25	Sn	≤ 0.05
Al	Residual	Ti	≤ 0.2
Mn	≤ 0.35	Ni	≤ 0.1
Zn	≤ 0.35	Pb	≤ 0.1

แหล่งข้อมูล : มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS Standard)

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติที่สำคัญของ AC4C

Density	2.68 g/cm^3
Liquidus	610 °C
Solidus (°C)	555 °C
Specific Heat	0.963 kJ/kg·K

แหล่งข้อมูล : มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS Standard)

กระบวนการไดคาสติ้งกึ่งของแข็งประยุกต์วิธี Nanocast มีขั้นตอนการทำงานพอสังเขปดังต่อไปนี้

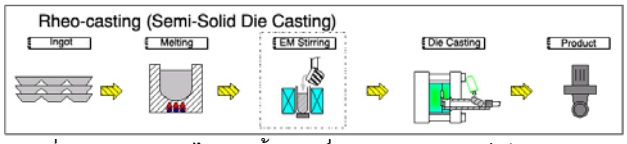
(1) เตรียมภาชนะสำหรับการผลิตโลหะผสมกึ่งของแข็ง

(2) เทน้ำโลหะลงไปในภาชนะดังกล่าว

(3) หลังจากที่อุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าทำงานที่ระยะเวลาหนึ่งแล้วจะทำให้อุณหภูมิของโลหะผสมเสถียร และได้สเลอรี่กึ่งของแข็งดังแสดงในรูปที่ 7

(4) บรรจุสเลอรี่กึ่งของแข็งที่ได้ลงในกระบอกสูบของเครื่องฉีดไดคาสติ้งเพื่อทำการผลิตชิ้นงานต่อไป

โดยขั้นตอนการทำงานทั้งหมดสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งประยุกต์วิธี Nanocast

รูปที่ 7 สเลอรี่กึ่งของแข็ง (AC4C)

โดยปกติ Curring time ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์นั้น หากเป็นกรณีของสควีซไดคาสติ้ง (Squeeze casting) จะใช้เวลาที่แปรผันตรงตามความหนาของชิ้นงาน แต่ในกรณีของกระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งแล้ว จะใช้เวลา Curring time เพียงแค่ประมาณกึ่งหนึ่งของกระบวนการสควีซไดคาสติ้ง เนื่องจากโลหะที่อยู่ในสถานะกึ่งของแข็งมีการปล่อยความร้อนแฝง (Latent heat) ออกมาแล้วประมาณครึ่งหนึ่ง จึงสามารถลดระยะเวลาการผลิตต่อรอบได้ และด้วยเหตุผลเดียวกันนี้เอง ทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ได้มากขึ้น

4. ผลการวิจัย

สำหรับการทดสอบค่าคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งประยุกต์วิธี Nanocast นี้ได้

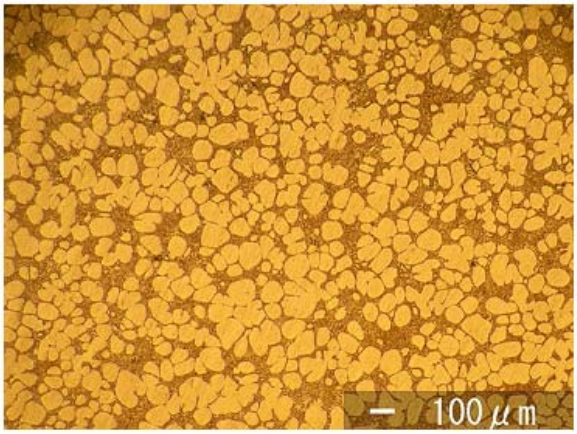
ใช้แม่พิมพ์ชิ้นงานทดสอบ No.4 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS Standard) และชิ้นงานผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อน (Heat treatment) ก่อนนำไปทดสอบค่าคุณสมบัติเชิงกล ดังแสดงในรูปที่ 9

รูปที่ 9 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง (AC4C)

จากผลการทดสอบชิ้นงานจะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไดคาสติงแบบกึ่งของแข็ง มีค่าคุณสมบัติเชิงกลทั้งค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (UTS) และค่าการยืดตัว (Elongation) ที่สูงกว่าดังแสดงในตารางที่ 3 นอกจากนั้นขนาดของผลึกปฐมภูมิมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 50~70 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 10 และที่สำคัญคือมีปริมาณของแก๊สผสมต่ำกว่า 1cc/100gAl ซึ่งหมายความถึงความสามารถในการนำไปผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อน (Heat treatable) หรือแม้กระทั่งความสามารถของการนำไปเชื่อม (Weldable) กับชิ้นงานอื่น

ตารางที่ 3 ค่าคุณสมบัติเชิงกลของ AC4C

Alloy	Process	Type	UTS (MPa)	Elongation (%)
AC4C	Nanocast	T6	300	10
AC4C	Permanent mold	T6	285	7.3



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของสเลอรี่กึ่งของแข็ง (AC4C)

5. ข้อวิจารณ์

จากการศึกษากระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็ง (Semi solid die casting) ด้วยวิธี Nanocast ทำให้ทราบว่า

1. โครงสร้างจุลภาคที่ละเอียด (Refined grain) ทำให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้มีความแข็งแรงสูง (High strength and pressure tightness) ซึ่งทำให้สามารถใช้เครื่องไดคาสติ้งที่มีอยู่ผลิตชิ้นงานที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการได้ในวงกว้างขึ้น

2. สามารถควบคุมสัดส่วนของของแข็ง (Fraction of solid) ได้อย่างง่าย

3. ของเสียประเภทโพรงหดตัว (Shrinkage) และฟองอากาศตกค้าง (Gas defect) ภายในชิ้นงานลดลงไปอย่างเห็นได้ชัดจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็ง

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

การดัดแปลงเครื่องฉีดไดคาสติ้งที่มีอยู่ในปัจจุบันเพียงเล็กน้อย ทำให้สามารถประยุกต์ใช้วิธี Nanocast ได้ ซึ่งจะส่งผลให้เทคโนโลยีไดคาสติ้งแบบกึ่งของแข็งนี้ ไม่จำกัดเฉพาะแต่ในบริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่เท่านั้น แต่จะสามารถขยายไปสู่บริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนขนาดกลางและขนาดย่อมได้ โดยกรณีของโลหะอะลูมิเนียมผสมนั้น สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 1/2 - 1/3 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุจำพวกดึงขึ้นรูป (Extrusion material) และได้ค่าความแข็งแรงที่สูงกว่า 1.3 เท่าและค่าการยืดตัวที่สูงกว่า 5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไดคาสติ้งแบบธรรมดา (Conventional die casting) นอกจากนั้นตามที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นว่าจะได้ความสมบูรณ์ (Soundness) ภายในเนื้อชิ้นงานที่สูงมาก

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ปริทรรศน์ พันธุบรรยงก์ และศาสตราจารย์ปราโมทย์ เดชะอำไพ จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนการเข้าร่วมโครงการวิจัยฯ ในครั้งนี้ และนอกจากนั้น ขอขอบพระคุณ Prof.ANZAI Koichi จาก Tohoku University และ Mr.ITAMURA Masayuki จาก Nanocast Corporation พร้อมทั้ง Mr.KIKUCHI Masao และ Mr.NAGASAWA Osamu จาก Tokyo Rika Co.,Ltd ที่ให้การสนับสนุนเครื่องจักรอุปกรณ์รวมทั้งให้โอกาสในการเข้าร่วมทีมวิจัย และในท้ายที่สุดต้องขอขอบพระคุณ Prof.NIYAMA Eisuke ที่ให้คำแนะนำและแง่คิดในการทำงานโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

1. M.C Flemings and R.Mehrabian, AFS Transactions 1973, pp. 81-89.

2. Watanabe et al., 2004 Japan Die Casting Congress, 229-234

3. Maeda T. et al., 2004 Japan Die Casting Congress, 217-221

4. Kikuchi M. et al., 1996 Japan Die Casting Congress, 209-213

5. Itamura M. et al., Imono Vol.68, 1996 , 493-498

6. Kaneuchi et al., Japan Foundry Engineering Vol.74, 2002, 595-600

7. Satoh et al., Keikinzoku Vol.50, 2000, 121-128

8. Adachi et al., 1998 Japan Die Casting Congress, 123-128

9. Y.Kobe and T.Tohata : IMONO, 64(1992), 864