

Domestic Lab Feasibility Study of NiTiInol Preparations

Sumalee VONGCHAN, and Weera PHLAWADANA

Department of Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Abstract

NiTi alloy at equi-atomic compositions exhibit an outstanding behavior, which is a shape memory. The alloys were developed by "Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory" NSA where a name "Nitinal" is standing for.

Even though a shape memory is excellent characteristic of NiTiInol but processing of the alloys still are uncertainties in many ways. It is known that shape memory behavior is depended strongly on many factors, such as alloying-compositions, melting-techniques, fabrication processes, heat treatments and also alloying elements.

A present experiment was aimed to a study of preparation NiTiInol by using a domestic laboratory in Thailand. An electric arc furnace was used for the experiment since it provided the well feasible conditions for melting process. Analysing of specimens were carried out by SEM.

It was found that the alloys show very good homogenizing, low impurity and equi-atomic compositions.

ความเป็นไปได้ของการเตรียมไนไทนอล ระดับห้องปฏิบัติการภายในประเทศ

สุมาลี วงศ์จันทร์ และวีระ พลวัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

โลหะผสมไนไทนอล ที่มีส่วนผสมโดยอะตอมใกล้เคียงกันนั้นมีคุณสมบัติพิเศษ คือการจำรูป (Shape Memory) โลหะดังกล่าวได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยห้องปฏิบัติการทางโลหะนิเกิล-ไทเทเนียม ของกรมสรรพาวุธแห่งกองทัพเรือสหรัฐฯ (Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory) ซึ่งเป็นที่มาของคำว่า ไนไทนอล โลหะผสมดังกล่าวนี้ถึงแม้จะมีคุณสมบัติพิเศษคือการจำรูปก็ตาม แต่ในการเตรียมโลหะดังกล่าวเพื่อนำไปใช้งานด้านต่างๆ ยังมีข้อจำกัดอีกมากมาย เนื่องจากคุณสมบัติของการจำรูป

Domestic Lab Feasibility Study of NiTiInol Preparations.

นั้นมีความไวต่อตัวประกอบหลายๆ ประการ เช่น อัตราส่วนผสมของตัวโลหะนิกเกิลและโลหะไทเทเนียม กรรมวิธีในการหลอม การขึ้นรูป การอบชุบด้วยความร้อน หรืออิทธิพลจากธาตุอื่นๆ ที่เป็นส่วนผสม

การวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นความจำเป็น ที่จะต้องศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมในไทนอลขึ้น ในระดับห้องปฏิบัติการในประเทศ โดยการใช้เตาอาร์คไฟฟ้า เนื่องจากพบว่าเตาแบบนี้ช่วยควบคุมผลกระทบจากตัวประกอบอื่นๆ ในการหลอมได้ดีพอสมควร พร้อมทั้งทำการทดสอบคุณสมบัติบางประการโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ SEM จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมของตัวอย่างโลหะผสมที่หลอมได้ มีค่าใกล้เคียงกับส่วนผสมก่อนการหลอม มีความบริสุทธิ์สูงตรงไม่พบสารเจือปนอื่นๆ และมีการกระจายตัว (Homogenization) ของโลหะนิกเกิลและโลหะไทเทเนียม อย่างสม่ำเสมอ

บทนำ

โลหะผสม NiTiInol ที่นำมาใช้ภายในประเทศไทย มีอยู่แพร่หลาย เช่น ภาควิชาทันตกรรมจัดฟัน คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นต้น ซึ่งเป็นการสั่งซื้อในลักษณะโลหะผสมสำเร็จรูปจากต่างประเทศ ยังไม่พบว่ามีมีการเตรียมโลหะผสมดังกล่าวขึ้นใช้เองในห้องทดลองภายในประเทศ งานวิจัยนี้จึงถือได้ว่าเป็นผู้ริเริ่มในการนำวัสดุคืบพร้อมทั้งเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องทดลองเพื่อเตรียมโลหะผสม NiTiInol ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเตรียมโลหะผสมดังกล่าวนี้ มีความยุ่งยากพอสมควร เนื่องจากคุณสมบัติที่ต้องการคือการจัดรูปนั้น จะมีความไวมากต่อตัวแปรต่างๆ ซึ่งข้อมูลที่ได้มีผู้ทำในต่างประเทศจึงอาจจะนำมาใช้ไม่ได้ดีนักกับการต้องเตรียมภายในประเทศ งานวิจัยครั้งนี้จึงพยายามทดสอบหาความเป็นไปได้ รวมถึงข้อดีและไม่ดีจากการทดลอง

ในการทดลองดังกล่าวจะเห็นว่า การหลอมโลหะผสม NiTiInol ควรหลีกเลี่ยงการหลอมด้วยเบ้าหลอมที่ใช้โดยทั่วไป เช่น เบ้าอะลูมินา บรรยากาศของการหลอมสุญญากาศหรือในบรรยากาศก๊าซเฉื่อยจะเป็นบรรยากาศที่เหมาะสม แต่ควรต้องระวังการเกิดก๊าซที่มีอยู่ในเนื้อโลหะ โดยเฉพาะโลหะนิกเกิลขณะหลอม ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกตัวของโลหะทั้งสองทำให้ส่วนผสมหลังการหลอมผิดไปจากเดิมมาก ทำให้เสียเวลาในการเตรียมชิ้นงานใหม่ การหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า นับว่าเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการเตรียมโลหะผสมดังกล่าว เนื่องจากสามารถควบคุมบรรยากาศในการหลอมได้ ใช้เวลาในการหลอมสั้น ทำให้หลีกเลี่ยงการทำ

ปฏิกิริยาระหว่าง ก๊าซออกซิเจนกับโลหะไทเทเนียมลงได้ สามารถพลิกชิ้นงานกลับไปมาเพื่อหลอมซ้ำๆ ได้หลายหนจนได้โลหะผสมที่ละลายเข้าหากันเป็นเนื้อเดียว และความแน่นของส่วนผสมที่เตรียมได้ก่อน และหลังการหลอมสามารถควบคุมให้มีค่าใกล้เคียงกันได้ดีพอสมควร ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติการจํารูป

การดำเนินงาน

กรรมวิธีและอุปกรณ์การหลอมโลหะนิกเกิล และโลหะไทเทเนียม

ในการหลอมโลหะบริสุทธิ์ทั้งสองเข้าด้วยกันในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิห้องโดยทั่วไปไม่สามารถให้โลหะผสม NiTi ที่มีคุณสมบัติใช้งานได้ เพราะการเกิดปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนเป็นอุปสรรค ดังนั้นจึงนิยมหลอมโลหะทั้งสองในบรรยากาศที่สามารถควบคุมได้ การใช้เตาหลอมแบบเตาเหนี่ยวนำแบบสุญญากาศ (Vacuum Induction) ในการผลิตชิ้นงาน NiTi ขนาดใหญ่ หรือการใช้เตาหลอมแบบลวดอาร์คไฟฟ้า (Consumable Electric Arc) ภายใต้สภาพสุญญากาศหรือบรรยากาศแวดล้อมเฉื่อย เป็นกรรมวิธีที่นิยมใช้มากกว่าในการเตรียมชิ้นงานขนาดเล็ก เพื่อการวิจัยโดยทั่วไป เนื่องจากโลหะไทเทเนียมเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ดี อีกทั้ง Ni และ Ti ในสภาพที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูง ยังเป็นตัวละลายวัสดูเรียมิกส์ เช่น อะลูมินา ซึ่งเป็นวัสดุทนไฟที่ใช้เป็นเบ้าหลอม (Crucible) โลหะได้สะดวก ทำให้น้ำหลอม NiTi มีโอกาสเปราะเป็นธาตุอื่นได้เสมอเมื่อทำการหลอม Ni กับ Ti ในภาชนะที่สร้างด้วย

วัสดุทนไฟดังกล่าว ในขณะที่เดียวกันที่ เบ้าหลอมที่สร้างด้วย วัสดุเซรามิกส์ เช่น สารประกอบออกไซด์ดังกล่าวจะถูกกัดกร่อนอย่างรุนแรง และประสบปัญหาอายุการใช้งานสั้นลงกว่าที่น่าจะเป็นในการใช้หลอมโลหะผสมอื่น ฉะนั้นความพิถีพิถันในการเลือกใช้เบ้าหลอมจึงถือเป็นเรื่องสำคัญ ที่วิศวกรต้องคำนึง Buchler and Wiley (1967) และผู้ร่วมงานของห้องปฏิบัติการทางโลหะของกรมสรรพาวุธทหารเรือสหรัฐอเมริกา ตกลงเลือกใช้เบ้าหลอมที่ทำจากกราไฟต์ บริสุทธิ์เท่านั้น ในการทดลองแต่ละครั้ง ที่ทำการหลอม 55-NiTi ในเตาเหนี่ยวนำแบบสุญญากาศขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดลองทราบว่ามีธาตุคาร์บอนเจือปนอยู่ในโครงสร้างของ NiTi ที่เตรียมได้อยู่ประมาณ 0.03 ถึง 0.08% โดยน้ำหนัก (Buchler and Gross, 1969) จุดอ่อนของเบ้าหลอมกราไฟต์ คือ การที่คาร์บอนทำปฏิกิริยาได้ง่ายกับนิกเกิลเหลวหรือไทเทเนียมเหลว ที่อุณหภูมิที่ธาตุทั้งสองหลอมละลาย อย่างไรก็ตาม เมื่อนิกเกิลและไทเทเนียมหลอมเข้าเป็นอันหนึ่งเดียวกันแล้ว โอกาสที่จะเป็นตัวละลายคาร์บอนเป็นไปได้อย่างยาก ด้วยเหตุในการเป็นตัวละลายธาตุที่ใช้ทำเบ้าหลอมนี้เอง จึงได้มีการศึกษาผลกระทบของปรากฏการณ์เช่นนี้กับวัสดุเซรามิกส์ที่ใช้สร้างเบ้าหลอมอีก เช่นเบ้าหลอมแมกนีเซียมออกไซด์ และพบว่าสารละลายของแข็งจำพวกออกไซด์มีเจือปนเพิ่มขึ้นในโครงสร้างผลิตภัณฑ์ 55-NiTi ถึง 0.18% โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถแก้ไขได้บ้างเพียงเล็กน้อย กล่าวคือการใช้ผลิตภัณฑ์ไทเทเนียมเกล็ด (Sponge Titanium) เป็นวัสดุคืบแทนในการหลอมผสมกับนิกเกิลในการเตรียมโลหะผสม 55-NiTi. Wasilewski, *et al.* (1967) กับพวกทดลองการหลอม Ni กับ Ti ใน Al_2O_3 crucible ผลปรากฏว่าได้โลหะผสมมีความปนเปื้อนออกซิเจนมากไม่เหมาะสมในการเตรียมโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมเมื่อใช้เตาเหนี่ยวนำแบบสุญญากาศ สำหรับเตาอาร์คไฟฟ้าแบบสุญญากาศ (Vacuum Electric Arc Furnace) หรือการหลอมนิกเกิลและไทเทเนียม บริสุทธิ์เข้าด้วยกัน โดยมีธาตุอื่นปนด้วย Vongchan (1981) แสดงการหลอม Ni : Ti : Mg ที่อัตราส่วนโดยอะตอม 52 : 46 : 2 ในเบ้าทองแดงหล่อเย็นภายในสภาพสุญญากาศสามารถทำการเตรียมโลหะผสม Ni-Ti-Mn

บริสุทธิ์เป็นชิ้นงานรูปทรงดัดกลมขนาดประมาณ 2 นิ้วหนา 3/4 นิ้วได้ สรรชัย ธนาชัยแสง และคณะ (2536) ทดลองเตรียม Ni-Ti ที่ส่วนผสม Equi-atomic ด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าแบบสุญญากาศพบว่าการละลายตัวเข้าหากันระหว่างโลหะไทเทเนียมกับโลหะนิกเกิลนั้นเป็นไปอย่างดี (Homogeneous) จากภาพถ่าย X-ray Mapping แสดงการกระจายตัวของส่วนผสมทั่วไป ทั้งโลหะนิกเกิลและโลหะไทเทเนียมเฟส แต่มีการสูญเสียไทเทเนียมไปเล็กน้อยเนื่องจากแรงดันของอาร์คกระทบเกล็ดไทเทเนียมในขณะทำการเริ่มอาร์ค ทำให้ไทเทเนียมบางส่วนกระเด็นออกนอกเบ้าทองแดง ซึ่งส่วนผสมที่ได้จะเปลี่ยนไปหลังการหลอม

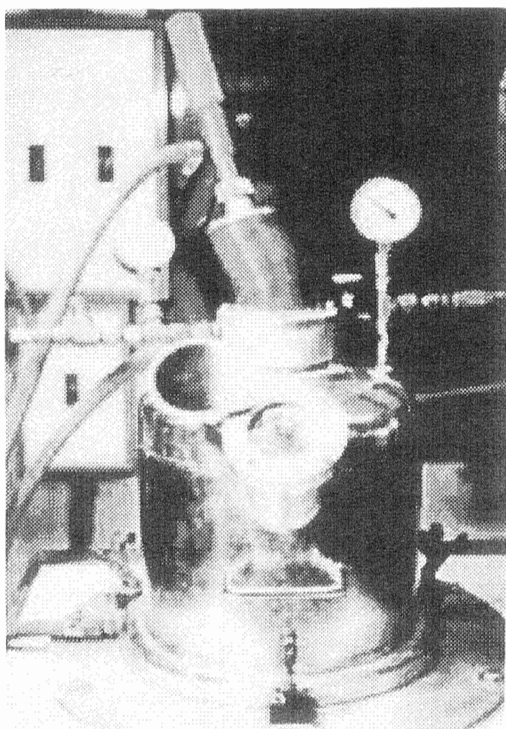
การวิจัยครั้งนี้ ได้พิจารณาเลือกใช้เตาอาร์คไฟฟ้าง่ายแสดงในภาพถ่ายในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงลักษณะภายนอกของระบบอุปกรณ์ของเตาดังกล่าวภายในเตาใช้ทองแดงแผ่นหนาเป็นแอโนด (anode) ขึ้นรูปโดยเครื่องกลึงและเครื่องเจียรนัยโลหะเป็นพื้นเตา แกะเป็นเบ้าหลอมโลหะที่ผิวแผ่นทองแดง (รูปที่ 2) โดยเฉพาะระบบการหล่อเย็นที่แผ่นทองแดงพื้นเตา (ArcStriker) ได้ออกแบบให้มีท่อน้ำหล่อเย็นภายในความหนาของแผ่นทองแดงพื้นเตาดังกล่าว ปล่อยน้ำอุณหภูมิห้อง ให้ไหลผ่านตลอดเวลาที่ทำการหลอมโลหะด้วยแท่งอาร์ค (Tungsten Cathode) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ที่ความดันเหนือความดันบรรยากาศเล็กน้อยประมาณ 2 Psi

การหลอมโลหะนิกเกิลกับโลหะไทเทเนียม

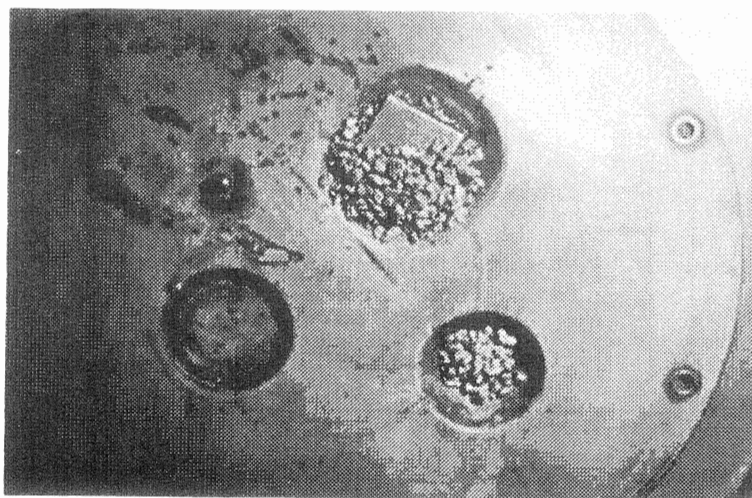
แผนภูมิสมมูลของ NiTi ในรูปที่ 3 (Buchler and Wiley, 1962) แสดงแผนภูมิของส่วนผสมต่างๆ ที่มีจำนวนอะตอมใกล้เคียงกัน (Equi-atomic) ในแผนภูมิสมมูลดังกล่าวจะประกอบด้วยสารประกอบกึ่งโลหะอยู่หลายชนิดคือ Ti_2Ni , $TiNi$ และ $TiNi_3$ จะเห็นได้ว่า Ti_2Ni เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาเพอริเทคติก (Peritectic) และมี $TiNi$ กับ $TiNi_3$ ที่ยูเทคติก (Eutectic) ได้อุณหภูมิ 800 °C NiTi จะเสถียรอยู่ในช่วงส่วนผสมที่กว้างจนถึงอุณหภูมิห้อง

Wasilewski, *et al.* (1969) พบว่าการหลอมละลายที่เข้ากันได้ดีที่สุด เมื่อ 50.8 ± 0.2 % โดยอะตอม การเกิดของ

Domestic Lab Feasibility Study of NiTiInol Preparattons.



รูปที่ 1 ลักษณะภายนอกของเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace)



รูปที่ 2 พื้นเตาอาร์คไฟฟ้าสร้างเข้าหลอมโลหะนิกเกิลและโลหะไทเทเนียม

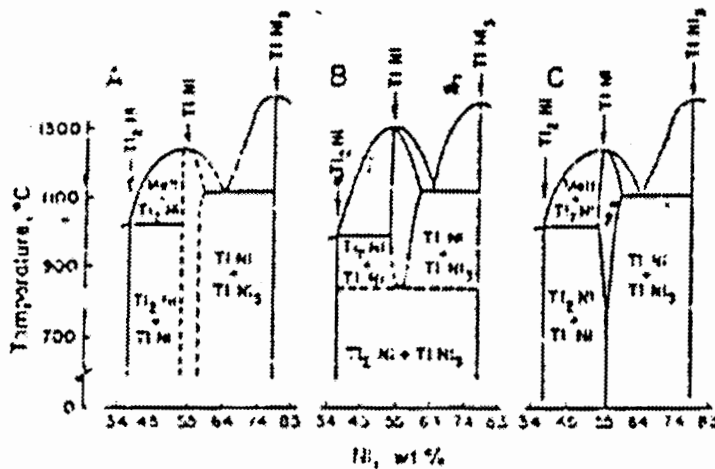
TiNi₃ อยู่ที่ระหว่าง 625 ± 20 °C สำหรับภายใต้อุณหภูมิ 500°C การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) ทำได้จำกัดมาก เพราะฉะนั้นการหลีกเลี่ยงเฟสที่มีโลหะนิเกิลมาก (Ni-rich) ควรพยายามทำให้อุณหภูมิสูงกว่า การเกิด TiNi₃ หนึ่ง กลุ่มนักวิจัยชุดนี้ยังเสนอแนะว่า การเปลี่ยนรูปของโครงสร้างโดยไม่เกิดการแพร่กระจาย ของ TiNi เป็นไปได้ที่อุณหภูมิประมาณ 60 °C

การพิจารณาแผนภูมิรูปที่ 4. ด้านของโลหะผสมที่มีโลหะไทเทเนียมมาก (Ti-rich) พบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อ NiTi ตรงข้ามกับการละลายของ Ni ในเฟส NiTi จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในลักษณะการเกิดการเพิ่มความแข็งโดยการเกิดเมล็ดผลึก (Precipitate Hardening Particle) ของ Ni₃Ti₂ ที่อุณหภูมิมากกว่า 625 °C และ Ni₃Ti₂ ที่อุณหภูมิมักกว่า 625 °C การคงที่ของเฟส NiTi จะอยู่ที่อุณหภูมิห้อง

การทดลองเพื่อการหลอมจริงในการวิจัยครั้งนี้ จึงกระทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 1400 °C โดยกำหนดให้มีการหลอมเฉพาะโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ครั้งสุดท้าย เพื่อกำจัดปริมาณกาซออกซิเจน ที่ยังเหลืออยู่ในห้องหลอมหลังจากที่

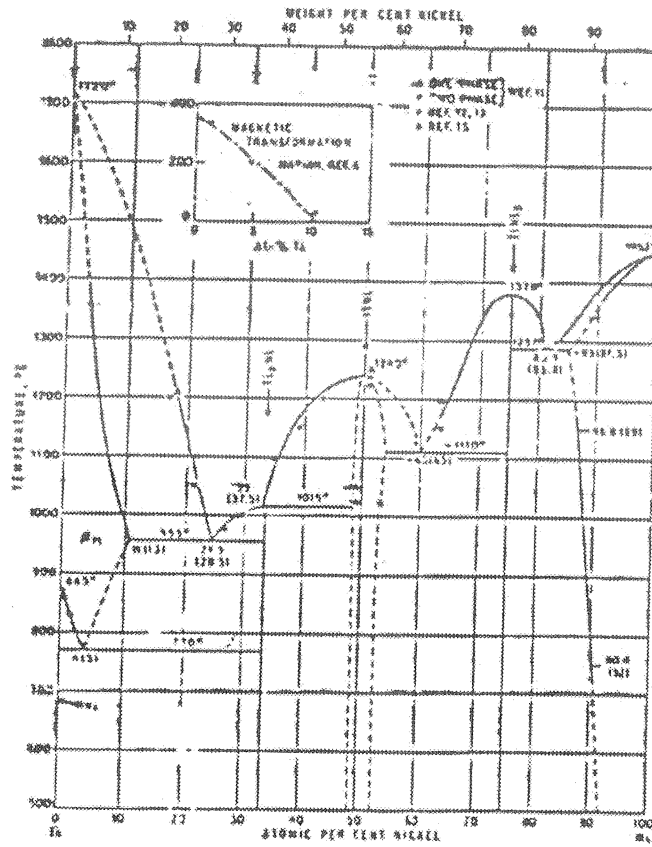
ได้ทำสุญญากาศครั้งสุดท้ายที่ 10⁻³ torr⁻¹ แล้วผ่านอาร์กอน-กาซจนความดันกลับคืนสู่ความดันห้องปกติ การหลอมให้ตั้งระยะอาร์คที่ใช้งาน 0.5-1 นิ้ว หลอมเหล็กโลหะไทเทเนียม (As receive Ti sponge) และเหล็กโลหะนิเกิล (Ni chips) ดังแสดงในรูปที่ 5. การเลือกใช้เหล็กโลหะไทเทเนียม เพราะเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ในข้อ 2.1 ส่วนการใช้เหล็กโลหะนิเกิล เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้ พบว่าการใช้โลหะนิเกิลแท่งใหญ่เท่าที่จัดหามาได้ทำให้ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ยากเมื่อทำเป็นชิ้นเล็กๆ การควบคุมการหลอมทำได้ดีกว่า การหลอมโลหะผสม Ni:Ti เท่ากับ 50:50 โดยจำนวนอะตอม

การทดสอบเบื้องต้นได้ปรับใช้ขนาดของ Ni Chip จนได้เหมาะสม (รูปที่ 5) เมื่อตรวจผิวภายนอกด้วยกำลังขยายต่ำ พบว่าลักษณะโดยทั่วไปดูรูปที่ 6 ด้านซ้ายของภาพ เป็นก้อนโลหะผสม NiTi เท่ากับ 50:50 ที่หลอมขึ้นเองในการวิจัยครั้งนี้เปรียบเทียบกับก้อนโลหะผสม NiTi หลอมจากห้องทดลองในประเทศสหรัฐอเมริกาด้านขวา ของภาพด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Welding) ภายใต้บรรยากาศเช่นเดียวกันมีคุณลักษณะใกล้เคียงกัน เพียงแต่

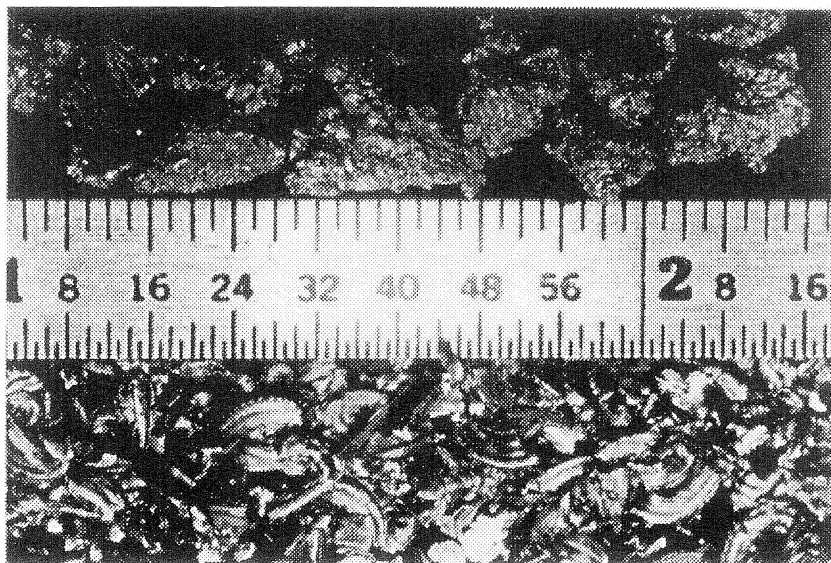


รูปที่ 3 แผนภูมิสมดุลของ NiTi ที่มีส่วนผสมใกล้เคียงโดยจำนวนอะตอม (equi-atomic composition)

Domestic Lab Feasibility Study of NiTiNi Preparations.



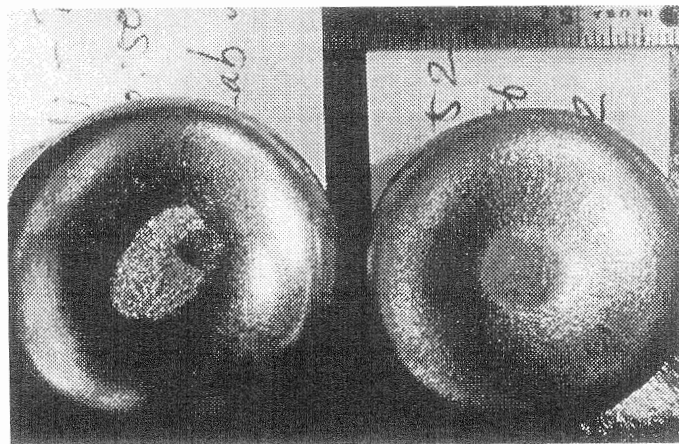
รูปที่ 4 แผนภูมิสมดุลของ TiNi โดย Margolin, et al. (1953)



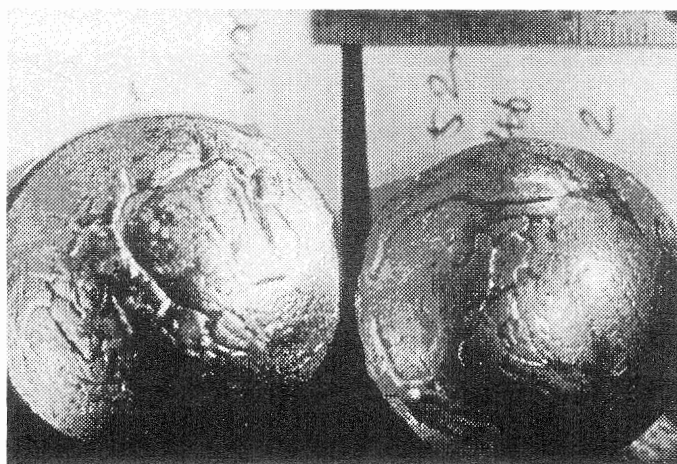
รูปที่ 5 เปรียบเทียบลักษณะทั่วไปของชิ้น Raw materials ก่อนทำการหลอม

ผิวของก้อน NiTi ด้านซ้ายมีความละเอียดกว่าก้อนทางด้านขวาทั้งสองก้อนมีสีคล้ำของผิวออกไซด์คล้ายสีทองในภาพ ทั้งนี้เนื่องจากผิวของทั้งสองก้อนเป็นด้านที่สัมผัสบรรยากาศโดยตรงภายในเตาเมื่อพิจารณาที่รูปที่ 7 แสดงด้านล่างของก้อนโลหะผสมทั้งสองก้อนที่หล่อจากภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ด้านซ้ายและจากห้องปฏิบัติการโลหะในต่าง

ประเทศ เช่นเดียวกัน ไม่แสดงความแตกต่างว่ากันมากนัก ทั้งคู่มีสีตามความเป็นจริงของ NiTi เนื่องจากเป็นด้านที่สัมผัสกับเบ้าหลอมโดยตรงกว่าด้านบนที่สัมผัสกับบรรยากาศในการหลอม รอยขุ่นแสดงถึงการหดตัว (Shrinkage) ของปริมาตรในส่วนนี้ซึ่งเป็นธรรมดาเพราะเป็นส่วนที่เย็นกว่า



รูปที่ 6 ผิวด้านบนชิ้นงานโลหะผสม NiTi เท่ากับ 50:50 โดยจำนวนอะตอม



รูปที่ 7 ผิวด้านล่างชิ้นงานรูปที่ 6. เป็นด้านสัมผัสกับพื้นเบ้าหลอมซึ่งสร้างด้วยแผ่นทองแดงหล่อเย็น

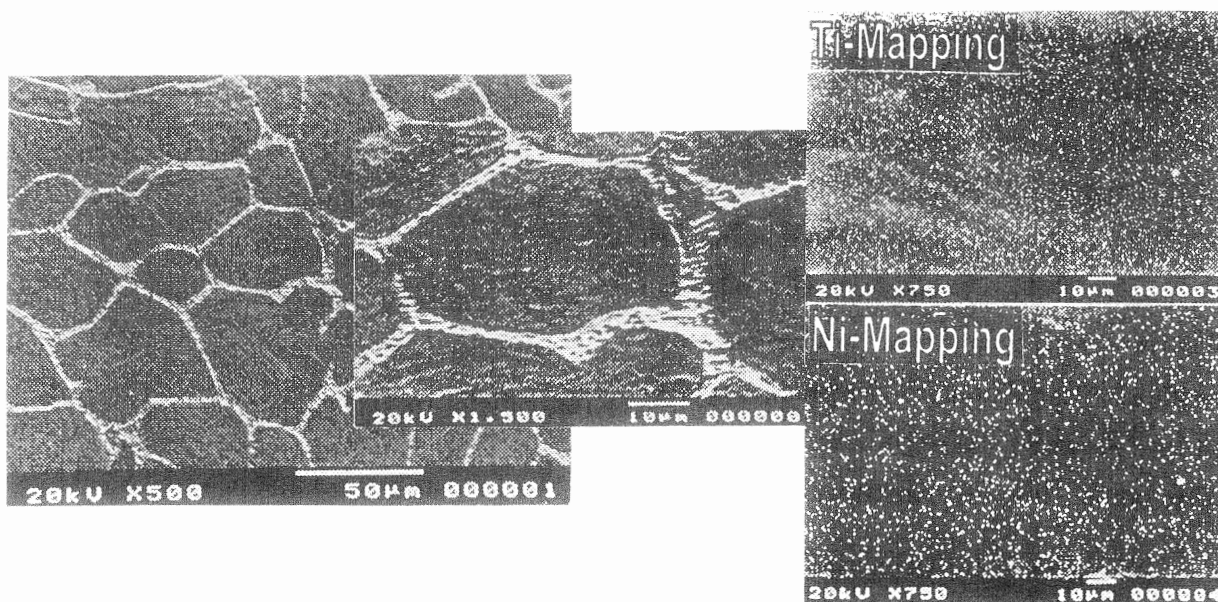
Domestic Lab Feasibility Study of NiTiInol Preparations.

การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM แบ่งเป็น

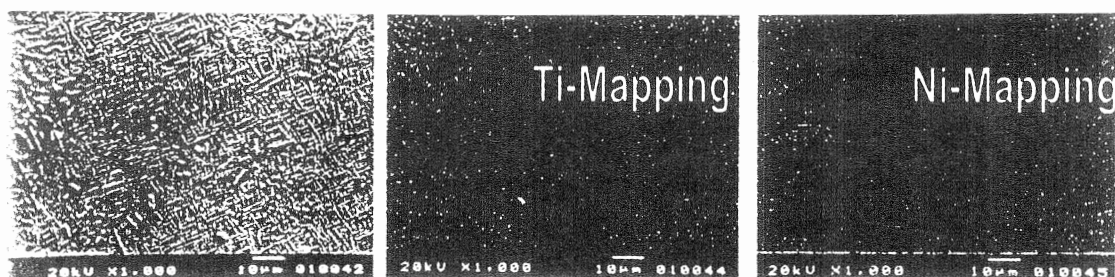
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยายสูง เนื่องด้วยเป็นการตรวจสอบที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นโครงสร้างจุลภาคจึงแสดงภาพของโลหะผสม NiTiInol ที่มีลักษณะโครงสร้างของเฟสแอลฟา ซึ่งจะเห็นเป็นเกรนลักษณะค่อนข้างกลม (Equi-axed grain) ดังรูปที่ 8 ในบางชิ้นงานจะเกิดโครงสร้างของ Widmanstattan หรือโครงสร้างรูปเข็ม (Acicular) ดังรูปที่ 9 ซึ่งเป็นเฟสแอลฟา

(Transformed beta) เช่นกัน เป็นองค์ประกอบหลักโดยทั่วไป ซึ่งโครงสร้างลักษณะดังกล่าวของเฟสแอลฟามีแตกต่างกันเนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่ต่างกัน รวมไปถึงระบบในโครงสร้างของเฟสเบต้า ซึ่งเปลี่ยนแปลงมา (Prior beta grain) ดังกล่าวแล้วว่าตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ไม่ผ่านการอัดขึ้นรูปและกลุ่มที่ผ่านการอัดขึ้นรูปซึ่งโครงสร้างจุลภาคของร่องรอยการอัดขึ้นรูป (Strained grain) จะแสดงให้เห็นได้ในตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ดังรูปที่ 10



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม NiTi และ X-ray mapping ของชิ้นงานที่ 6



รูปที่ 9 เฟสแอลฟา (Transformed beta) โครงสร้างรูปเข็ม (Widmanstattan) และ X-ray mapping ของชิ้นงานที่ 1

การวิเคราะห์ผลทางคุณภาพ (Qualitative analysis) และผลทางปริมาณ (Quantitative analysis) ของตัวอย่างการทดลองในการวิเคราะห์โลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ (Ti-Sponge) และโลหะนิกเกิลบริสุทธิ์ ด้วยเครื่อง EDEX พบว่าโลหะทั้งสองชนิดดังกล่าวที่ใช้เป็นวัตถุดิบจะประกอบด้วยโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์และโลหะนิกเกิลบริสุทธิ์ ดังแสดงในรูปที่ 11. มีความบริสุทธิ์ของโลหะไทเทเนียม 99.9% ส่วนโลหะนิกเกิลมีความบริสุทธิ์ 98.9%

สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มในข้อ 3.1 ด้วย EDEX พบว่าชิ้นงานจะแสดงพีก (peak) เด่นของโลหะสองชนิดคือพีกของโลหะไทเทเนียม และโลหะนิกเกิล ดังแสดงในรูปที่ 12. ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์โดยเฉลี่ยอันได้จากชิ้นตัวอย่างที่หล่อได้หลายๆ ชิ้น

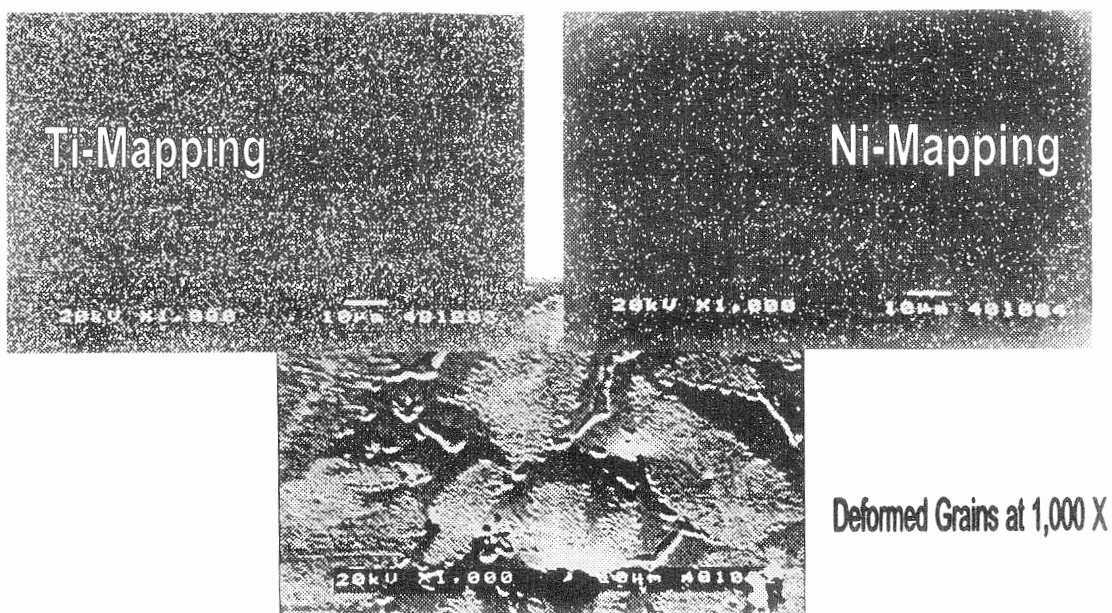
การวิเคราะห์การกระจายตัวของโลหะไทเทเนียมและโลหะนิกเกิลในโลหะผสม NiTi โดย EDEX

ผลการทำ X-ray mapping ของโลหะไทเทเนียมและโลหะนิกเกิลของชิ้นงานทดลองทั้งสองกลุ่ม เมื่อเปรียบเทียบภาพของโครงสร้างจุลภาคและ X-ray mapping ที่พื้นที่เดียวกันจะเห็นว่าทุกชิ้นงานของตัวอย่างจากทั้งสองกลุ่มจะแสดงการกระจายตัวของโลหะไทเทเนียมและโลหะนิกเกิลอย่างสม่ำเสมอ ไม่พบการรวมกลุ่มของทั้งโลหะไทเทเนียม

หรือโลหะนิกเกิลในบริเวณเฉพาะพื้นที่ใดพื้นที่หนึ่ง จึงอาจกล่าวได้ว่าการหลอมโลหะผสมจำรูปในไทนอล โดยการใส่เตาอาร์คไฟฟ้าในงานวิจัยครั้งนี้ สามารถเตรียมโลหะผสมในไทนอลที่มีเนื้อโลหะผสมที่สม่ำเสมอ (Homogeneous) และมีส่วนผสมใกล้เคียงกับความต้องการได้ดีพอสมควร

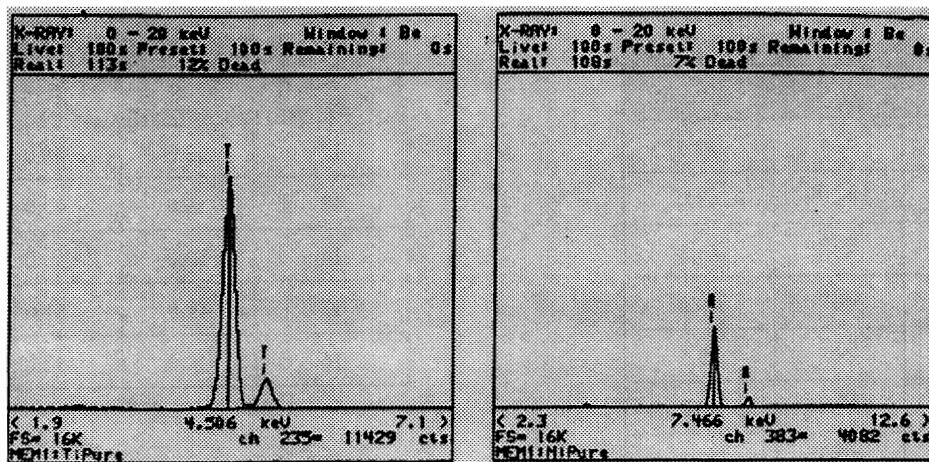
สรุปผลการทดลอง

การเตรียมโลหะผสมในไทนอลจำรูปที่มีส่วนผสมของจำนวนอะตอมใกล้เคียงกัน (Equi-atomic) สามารถกระทำได้โดยใช้เตาหลอม Vacuum Arc Furnace ประกอบเข้าหลอมทองแดงหล่อเย็น (Cooling Copper Heart) ผลกระทบที่มีต่อการหลอม และโครงสร้างของโลหะผสมที่ได้คือ ขนาดของชิ้นงานโลหะนิกเกิลและโลหะไทเทเนียม ชนิดของวัสดุเข้าหลอม บรรยากาศแวดล้อมในการหลอมกรรมวิธีใช้ Arc ระหว่างการหลอม สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานต้นแบบ จำนวน 16 ชิ้น โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 พบว่าสามารถควบคุมปริมาณของ Ni : Ti ได้ในสัดส่วนที่เหมาะสมหลังการหลอมได้ดีที่สุด ที่ 49:51 โดยจำนวนอะตอม

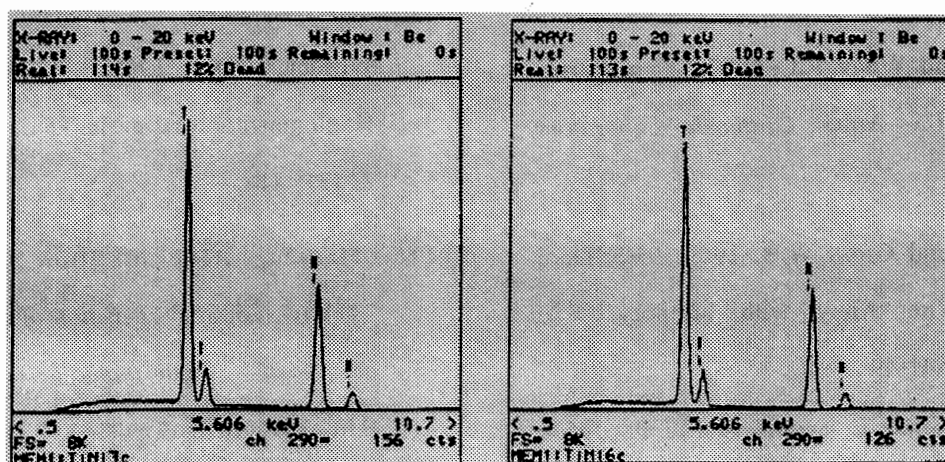


รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของร่องรอยการอัดขึ้นรูป (Strained grain) และ X-ray mapping ของชิ้นงานที่ 15

Domestic Lab Feasibility Study of NiTiInol Preparations.



รูปที่ 11 ผลวิเคราะห์ EDEX ของโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์ และโลหะนิกเกิลบริสุทธิ์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ



รูปที่ 12 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ปริมาณโดย EDEX ของโลหะผสม NiTi ที่ได้จากการทดลองเตรียมขึ้นเอง

ตารางที่ 1 ส่วนผสมชิ้นงานทดลองกลุ่มที่ 1
(ไม่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป)

ตัวอย่างที่	%โดยอะตอม	
	นิกเกิล	ไทเทเนียม
1	52.5	47.5
2	52.0	48.0
3	51.5	48.5
4	51.0	49.0
5	50.5	49.5
6	50.0	50.0
7	49.5	50.5
8	49.0	51.0
9	48.5	51.5
10	48.0	52.0
11	47.5	52.5

ตารางที่ 2 ส่วนผสมชิ้นงานทดลองกลุ่มที่ 2
(ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป)

ตัวอย่างที่	%โดยอะตอม	
	นิกเกิล	ไทเทเนียม
12	52.0	48.0
13	51.0	49.0
14	50.0	50.0
15	49.0	51.0
16	48.0	52.0

เอกสารอ้างอิง

- Buehler, W.J. and Wiley, R.C. 1962. TiNi –Ductile Intermetallic compound. *Transaction of ASM*. **55** : 269 –276.
- Buehler, W.J and Wiley, R.C. 1967. The properties of TiNi. *US. Naval Ordnance Laboratory*, 3 Aug.
- Buehler, W.J. and Gross, W.B. 1969. 55-NiTi-nol Unique Wire Alloy with Memory. *Wire Journal*. **2** : 41-49 .
- Margolin, H., Emce, E. and Nelson, J. P. 1953. Titanium Nickel Phase Diagram. *Transaction of AIME*. **197** : 243-247.

Vongchan, S. 1981. *Effects of Manganese addition on the Transformation Behavior of NiTi Memory Alloys*. Ph.D. Thesis. New York, PINY.

- Wasilewski, R. J., Butter, S. R. and Hanlar, J. E. 1967. On the Martensitic Transformation in TiNi. *Metal Science Journal*. **1** : 104-110.
- Wasilewski, R. J., Butler, S. R., Hanlon, J. E. and Worden, D. 1969. The structure Homoginization range in TiNi. *J. Metals*. **21** (3) : 414.

สรรชัย ชนาแสง, หิรัญ เศรษฐักคี และสุมาลี วงจันทร์. 2536. *Preperation of NiTi Alloys at near Equi-atomic composition*. ภาคนิพนธ์ระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์โลทหาร คณะวิศวกรรมฯ จุฬาฯ.