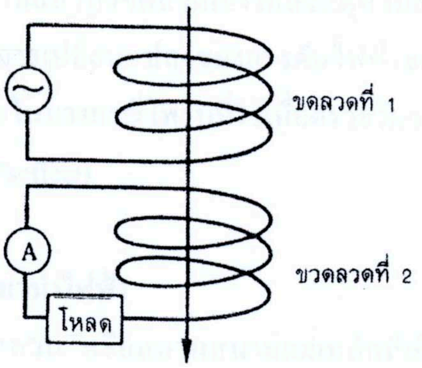
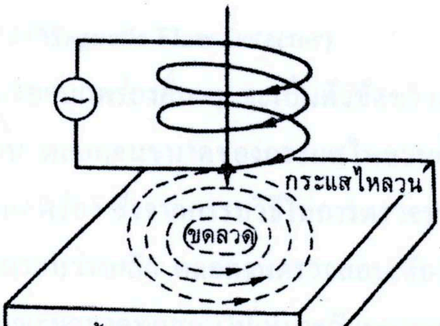
บทที่ 3
การทดสอบโดยวิธีใช้กระแสไหลวน
(Eddy Current Testing)

การทดสอบโดยใช้วิธีกระแสไหลวนเป็นการทดสอบแบบไม่ทำลาย[1-6]วิธีหนึ่งที่ได้รับการนิยมอย่างมาก โดยเฉพาะการทดสอบแผ่นโลหะที่มีความหนาไม่มากนัก สำหรับหลักการทำงานเบื้องต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูป 3.1 ปรากฏการณ์การเกิดการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.1 เมื่อให้กระแสไฟสลับไหลผ่านขดลวด 1 แล้วนำเข้าใกล้ขดลวดที่ 2 ก็จะเกิดปรากฏการณ์เหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าคร่อมขดลวดที่ 2 และมีกระแสไฟฟ้าสลับไหลในวงจรไฟฟ้านั้นในลักษณะที่คล้ายคลึงกันในรูปที่ 3.2 เมื่อนำขดลวดที่มีกระแสไฟสลับไหลเข้าใกล้ชิ้นส่วนทดสอบที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า ก็จะเกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไหลวนรอบ ๆ ชิ้นส่วนทดสอบ



รูป 3.2 ลักษณะการเกิดกระแสไหลวน

การทดสอบโดยใช้คุณสมบัติการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้านี้เป็นการใช้สนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนไปตามเวลา เมื่อนำสนามแม่เหล็กเข้าใกล้สารตัวนำ เช่น พวกวัสดุที่เป็นแผ่นโลหะ แล้วใช้ผลของการเกิดกระแสเหนี่ยวนำหรือความเป็นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสารตัวนำ เพื่อการทดสอบวัสดุ เนื่องจากหลักการทดสอบนี้ใช้กระบวนการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าในความหมายกว้าง ๆ แล้วจึงเรียกวิธีการทดสอบนี้ว่า การทดสอบโดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการใช้ผลของการเกิดกระแสไหลวนขึ้นในวัสดุตัวนำจากการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า จึงมีการเรียกอีกชื่อว่าการทดสอบโดยใช้กระแสไหลวน วิธีการทดสอบโดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้านี้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า

ส่วนมากในการใช้การทดสอบโดยวิธีเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะให้กระแสสลับความถี่หลายเมกะเฮิรทซ์(MHz) ไหลผ่านขดลวดแล้วนำขดลวดเข้าใกล้วัสดุตัวนำ ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ของขดลวดหรือวัดหาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าของขดลวด บางครั้งแทนที่จะใช้กระแสสลับอาจใช้กระแสพัลซ์หรือในบางกรณีโพรบที่ใช้เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอาจใช้เป็นแบบที่อาศัยปรากฏการณ์ของฮอลล์ (Hall'seffect)

3.1 ชนิดของการทดสอบโดยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ลักษณะการเกิดกระแสไหลวน หรือสภาพสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุตัวนำหรือชิ้นส่วนทดสอบ จะมีค่าหรือลักษณะแตกต่างกันไปตามสภาพหรือองค์ประกอบต่างๆ ของคุณสมบัติของตัวนำ เช่น ค่าการนำไฟฟ้า(Conductivity) , ค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (Permeability) ลักษณะ รูปร่างตลอดจนขนาดของชิ้นส่วนการมีรูหรือรอยแตก นอกจากนี้ระยะระหว่างขดลวดกับชิ้นส่วนทดสอบก็มีผลอีกด้วย ซึ่งค่าแปรเปลี่ยนต่าง ๆเหล่านี้จะเป็นตัวดัชนีแสดงผลต่าง ๆ ในการทดลองจึงได้มีการนำผลจากการทดสอบการเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาใช้เป็นกรรมวิธีในการตรวจหาคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น การหารอยแตกร้าวในวัสดุ การหาคุณสมบัติของวัสดุ(การตรวจหาวัตถุแปลกปลอม) การวัดความหนาของชั้นฟิล์ม การตรวจหาขนาด ซึ่งจะสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายประการ

3.1.1 การตรวจหารอยร้าว (Magnetic Flaw Detector)

รอยร้าวตลอดจนรอยบกพร่องอื่น ๆ จะเป็นตัวขัดขวางการไหลของกระแสมีผลกระทบต่อการกระจายของกระแสไหลวน ตลอดจนขนาดของกระแสไหลวนด้วย การทดลองตรวจสอบจึงเป็นการหาเพื่อแสดงลักษณะของรอยบกพร่อง ซึ่งจากกรรมวิธีในการตรวจหารอยบกพร่องนี้ได้นำมาใช้ในการตรวจสอบสินค้า ตรวจสอบชิ้นงานระหว่างผลิต ตลอดจนตรวจสอบเพื่องานซ่อมบำรุง นอกจากนี้จะต้องมีการเลือกอุปกรณ์ วิธีการและลักษณะขดลวดทดสอบให้เหมาะกับขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วนทดสอบด้วย

(ก) การตรวจสอบชิ้นงาน หรือผลิตภัณฑ์

เหล็ก, ท่อที่ทำจากเหล็ก หรือเหล็กกล้า และวัสดุที่ไม่ใช้เหล็ก ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างเป็นแท่ง ตอลดจนเส้นลวดนั้น ลักษณะของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถจัดให้มีการตรวจสอบชิ้นงาน

ได้ทุกชิ้นที่กำลังผลิตอยู่ โดยใช้ดูว่ามีรอยบกพร่องบริเวณผิวหรือใกล้ ๆ กับผิวหรือไม่ (ใช้ดูผิวในผิวนอกหรือบริเวณเนื้อในของท่อที่ไม่หนามากนัก) โดยทั่วไปใช้วิธีให้ชิ้นงานผ่านขดลวด วิธีจะตรวจเห็นขนาดของรอยบกพร่องเป็นสัดส่วนสัมพัทธ์กับขนาดของชิ้นงาน สำหรับรอยบกพร่องที่มีขนาดเล็กเทียบกับชิ้นงานที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ ในปัจจุบันใช้โพรบที่หมุนได้รอบ ซึ่งแม้ว่าถ้าเทียบความละเอียดในการตรวจหารอยบกพร่องแล้วแบบโพรบดีกว่าแบบขดลวดก็จริง แต่การทำงานช้ากว่า นอกจากนี้ยังได้มีการกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบ ตลอดจนค่าความละเอียด โดยใช้ชิ้นส่วนที่มีรอยบกพร่อง ที่ทำขึ้นเทียบกับขนาดของชิ้นงานทดสอบ

(ข) การตรวจสอบในกระบวนการผลิต (Intermediate Inspection)

ใช้ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในกระบวนการผลิต ซึ่งก็เหมือนกับการตรวจผลิตภัณฑ์สำเร็จเป็นการตรวจชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นท่อหรือแท่งต่างๆ เพื่อให้พบจุดบกพร่องได้เร็วเพื่อใช้ในการควบคุมขั้นตอนการแปรรูป โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว ผลการวัดมักแจ้งเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อป้อนข้อมูลกลับ (Feed Back)ได้อย่างรวดเร็ว วิธีนี้มักใช้ประกอบกับการตรวจผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปเพื่อควบคุมคุณภาพ

(ค) การตรวจเพื่อการบำรุงรักษา

ในโรงงานเคมี หรือโรงกลั่นน้ำมัน ชิ้นส่วนพวกท่อตลอดจนชิ้นส่วนท่อขนาดเล็ก ๆ ในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) จำเป็นต้องมีการตรวจสอบเป็นระยะ การตรวจสอบชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ในเครื่องบินก็เช่นกัน การตรวจสอบภายในท่อนั้นใช้ขดลวดสอดเข้าด้านในของท่อ ส่วนการตรวจสอบชิ้นส่วนของเครื่องจักร มักใช้โพรบเป็นส่วนใหญ่

3.1.2 การตรวจสอบวัสดุเพื่อคัดแยกหาวัสดุที่ต่างชนิดกัน

การใช้วิธีการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าตรวจสอบวัสดุ สำหรับการตรวจสอบส่วนผสม (Components)ของวัสดุประเภทโลหะนั้นใช้คุณสมบัติความเป็นตัวนำไฟฟ้า (หรือความต้านทานไฟฟ้า) ที่แปรเปลี่ยนหลังจากการจัดการทางความร้อน (Heat Treatment) นอกจากนี้ยังใช้การดูค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนอีกด้วย

ส่วนวัสดุประเภทที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก เช่น สารประเภท ทองแดง,อลูมิเนียม ใช้การวัดค่าตัวนำไฟฟ้าถ้าเป็นสารพวกเหล็ก มักใช้ค่าแตกต่างของความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก ตลอดจนลักษณะแตกต่างของฮีสเตอริซิสแม่เหล็ก การใช้การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้านั้น เนื่องจากกระแสไหลวนเกิดขึ้นที่ผิวจึงต้องระมัดระวังผลกระทบจากคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของผิวนอกของวัสดุด้วย

นอกจากนี้ ยังใช้วิธีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อตรวจหาสารโลหะในเนื้อของสารอโลหะได้อีกด้วย

3.1.3 การวัดความหนาของชั้นฟิล์ม

เมื่อระยะระหว่างขดลวดทดสอบกับตัวนำเปลี่ยนไปค่ากระแสไหลวนที่วัดได้ก็จะเปลี่ยนไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Lift Off Effect ซึ่งนำมาใช้ในการวัดความหนาของชั้นฟิล์มของสารที่ไม่เป็นตัวนำที่เคลือบชั้นวัสดุอยู่ วิธีนี้มีการนำมาใช้เพื่อการวัดความหนาของฟิล์ม อัลไมท์ นอกจากนี้ ก็ยังนำมาใช้วัดความหนาของชั้นฟิล์มโลหะบาง ๆ ด้วย

3.1.4 การตรวจสอบระยะ รูปร่าง

เนื่องจากระยะระหว่างขดลวดทดสอบกับวัสดุทดสอบที่แตกต่างกัน จะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้เปลี่ยนแปลงไปจึงสามารถใช้ในการวัดระยะ และวัดขนาดหรือรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้ตาราง 3.1 แสดงการใช้การตรวจชิ้นงานด้วยวิธีเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า

ตาราง 3.1 การใช้วิธีเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าในการตรวจสอบวัสดุในลักษณะต่างๆ

ชนิดของการตรวจสอบ	องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อค่ากระแสไหลวน	ขดลวดตรวจสอบ	วัสดุที่นำมาทดสอบ
การตรวจสอบหารอยร้าว	รอยบกพร่อง รูปร่าง, ขนาด,ตำแหน่ง)	ขดลวดแบบขดวงกลมกลวง(Annular Coil)	ท่อ,เส้น,แท่งกลม
		โพรบคอยล์ (Probe Coil)	แท่งกลม, บิลเลท, แผ่น,ท่อ
		ขดลวดแบบสอดใน (Inside Coil)	ท่อ,รู
การตรวจสอบวัสดุ	การนำไฟฟ้า	โพรบคอยล์ ขดลวดแบบขดวงกลมกลวง	วัสดุที่ไม่ใช่เหล็ก
	ค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก	ขดลวดแบบขดวงกลมกลวง	วัสดุเหล็กหรือเหล็กกล้า
การตรวจวัดความหนาของชั้นฟิล์ม	ระยะระหว่างขดลวดกับตัวนำ	โพรบคอยล์	ความหนาของชั้นของสารอโลหะบนผิวของโลหะ
	ค่าเปลี่ยนของความหนาของชั้นฟิล์ม		ความหนาของโลหะ
การตรวจวัดระยะและรูปร่าง	ระยะ,รูปร่าง,ขนาด	โพรบคอยล์	โลหะ

3.2 ลักษณะพิเศษของการตรวจสอบโดยใช้ความเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า

จุดเด่นหรือลักษณะพิเศษของการตรวจสอบ โดยใช้ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่แตกต่างจากการตรวจสอบแบบไม่ทำลายแบบอื่น ๆ มีดังนี้

(1) ของที่มีลักษณะท่อ เส้น ท่อนกลม จะสามารถตรวจได้อย่างรวดเร็วและทำการตรวจทุกชิ้น โดยเครื่องอัตโนมัติได้

(2) สามารถตรวจวัด แม้ในที่อุณหภูมิสูง ชิ้นงานเส้นเล็ก ๆ หรือภายในรู ซึ่งการตรวจสอบด้วยวิธีอื่นทำแทบไม่ได้

(3) ค่าที่วัดได้สามารถรับเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ ทำให้สามารถนำมาใช้ในการประมาณขนาดรอยบกพร่อง,และนำไปใช้ในการควบคุมการผลิตได้ง่าย

(4) การตรวจหารอยร้าว ตลอดจนตรวจเนื้อวัสดุ สามารถให้ข้อมูลจำนวนมากในเวลาเดียวกันได้

(5) สามารถเก็บรักษาข้อมูลไว้ได้ ทำให้มีประโยชน์ต่อการตรวจสอบเพื่อการบำรุงรักษา

สำหรับจุดด้อย หรือข้อเสียของการตรวจวัดโดยวิธีใช้การเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าก็มีดังนี้

(1) การตรวจหาจุดบกพร่องบริเวณผิว ทำได้ผลดีมาก แต่บริเวณที่ลึกลงไปจะตรวจได้ยาก

(2) ค่าที่วัดได้จะได้รับอิทธิพลจากการสั่นสะเทือน, ชนิดของวัสดุ ขนาดของวัสดุและสัญญาณรบกวน(Noise) อื่น ๆ ได้ง่าย

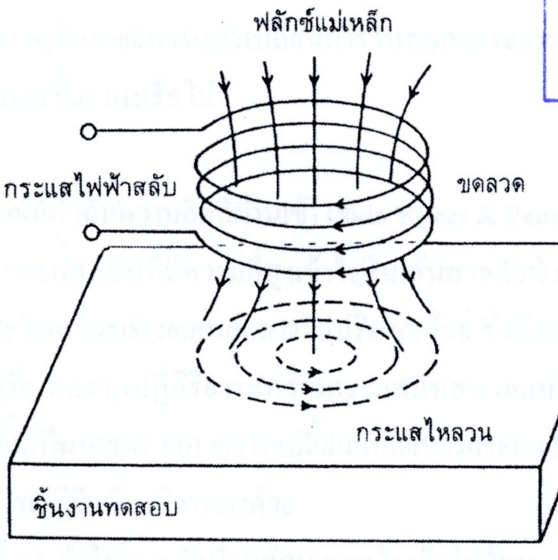
(3) การจะตรวจเพื่อแยกแยะชนิด รูปร่าง ขนาดของรอยบกพร่องให้แน่นอนและละเอียดทำได้ยาก

(4) มีประสิทธิภาพต่ำในการจะตรวจหารอยร้าวทั้งหมดของชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน

3.3 หลักการของกระแสไหลวน

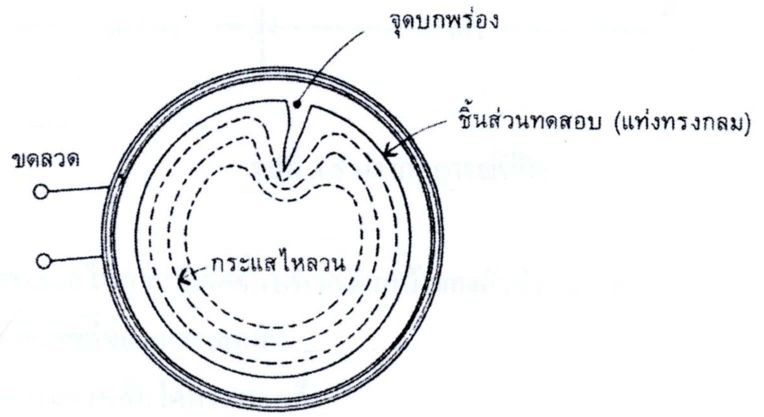
3.3.1 การเกิดกระแสไหลวน

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 7 ธ.ค. 2555
เลขทะเบียน 190945
เลขเรียกหนังสือ



รูปที่ 3.3 การเกิดกระแสไหลวน

จากรูปที่ 3.3 เมื่อนำขดลวดที่มีกระแสไฟผ่านเข้าใกล้ชิ้นตัวนำ (ชิ้นงานทดสอบ) บริเวณรอบ ๆ ขดลวดจะเกิดสนามแม่เหล็กกระทำต่อชิ้นตัวนำ เนื่องจากสนามแม่เหล็กของขดลวดนั้นเกิดจากกระแสสลับ ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กที่กระทำต่อชิ้นตัวนำจะมีทิศทางและขนาดแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งในกรณีเช่นนี้จะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่กระทำต่อชิ้นตัวนำ จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่อต้านการเปลี่ยนของฟลักซ์แม่เหล็กบนตัวนำนี้ในรูป 3.3 จะแสดงเป็นเส้นประไปรอบ ๆ เส้นแรงบนตัวนำ ซึ่งลักษณะของกระแสที่เกิดขึ้นบนตัวนำนี้เรียกว่า กระแสไหลวน ขนาดของกระแสไหลวนที่เกิดบนชิ้นตัวนำ ตลอดจนลักษณะการกระจายขึ้นอยู่กับจำนวนความถี่ ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นตัวนำ ค่าแม่เหล็ก รูปร่างและขนาดของชิ้นตัวนำ กระแสในขดลวด ระยะที่ห่างจากชิ้นตัวนำ และแปรเปลี่ยนตามลักษณะของรอยบกพร่อง เช่น รอยแตกบนชิ้นตัวนำดังที่แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รอยบกพร่องกับกระแสไหลวน

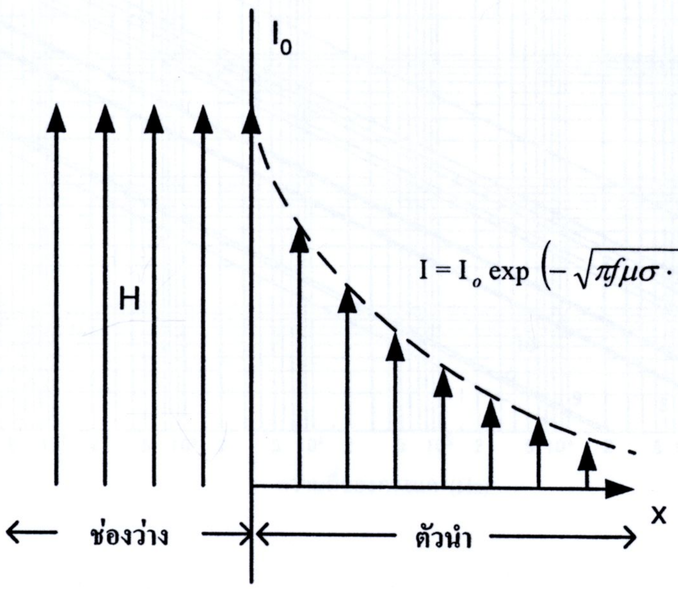
ดังนั้น จากการดูลักษณะการแปรเปลี่ยนการไหลของกระแสไหลวนบนชิ้นส่วนทดสอบก็จะทราบได้ว่ามีรอยบกพร่องบนชิ้นงานหรือไม่

3.3.2 ปรากฏการณ์ที่ผิวกับความลึกที่ผ่านเข้า (Skin Effect & Penetration)

เมื่อผ่านกระแสสลับที่มีความถี่สูงเข้าไปในเส้นลวดตัวนำ กระแสจะรวมกันไหลอยู่ตามบริเวณใกล้ ๆ ผิวหน้า และไหลในบริเวณศูนย์กลางในปริมาณน้อย ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ที่ผิว (Skin Effect)ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างกระแสกับสนามแม่เหล็ก การตรวจสอบโดยใช้การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนที่เกิดขึ้นภายในสารตัวนำ จึงจำเป็นต้องนำปรากฏการณ์ที่ผิวนี้มาพิจารณาด้วย

ในรูปที่ 3.5 ถ้าให้สารตัวนำมีลักษณะกว้างกึ่งไม่รู้จบ และมีสนามแม่เหล็ก H จากกระแสสลับมากระทำ กระแสไหลวน I ที่เกิดขึ้นจะมีค่าลดลงไปตามสัดส่วนกับระยะทางจากผิว X

$$I = I_o \exp\left(-\sqrt{\pi f \mu \sigma} \cdot x\right) \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.5 ปรากฏการณ์ที่ผิว

ในที่นี้ I_o เป็น ค่ากระแสไหลวนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวนำ (x = o)

f เป็น ค่าความถี่ของกระแสสลับ

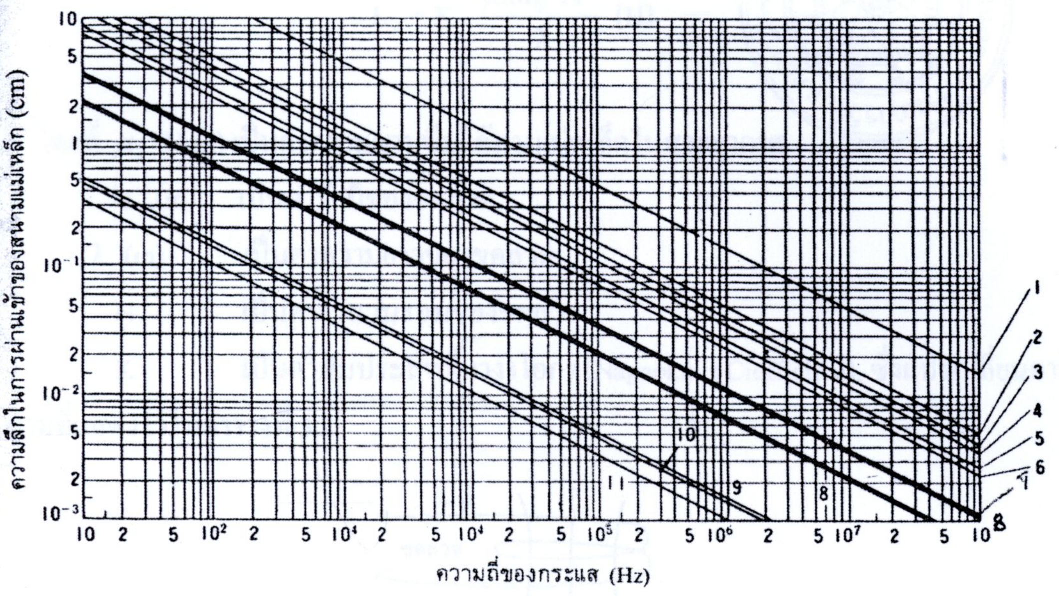
μ เป็น ค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก

σ เป็น ค่าการนำไฟฟ้า

ตามสูตรที่ 3.1 ถ้าให้ค่าในวงเล็บ = -1 กล่าวคือให้ $\sqrt{\pi f \mu \sigma}$ .x =1 และ x = δ แล้วจะได้ว่า

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{3.2}$$

δ จะเป็นค่า x ซึ่ง I ที่ตำแหน่งนั้นมีค่า 1/e ของ I_o δ เป็นค่าที่ใช้แสดงความลึกของการผ่านเข้าของสนามแม่เหล็กประมาณ 37 % ของค่า I_o จากสูตรนี้จะเห็นได้ว่า ถ้าค่า f, μ หรือ σ มีค่ามากขึ้น ค่าความลึกในการผ่านเข้าก็จะลดลง ดังนั้นการใช้การตรวจสอบโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะตรวจหาค่าความลึกให้มากขึ้นไปจากค่าความลึกดังกล่าวเป็นหลาย ๆ เท่าย่อมเป็นไปได้ยาก ซึ่งจากสูตรที่ 3.2 จำเป็นจะต้องกำหนดค่าของความถี่เพื่อใช้ในการตรวจให้เหมาะสมกับชนิดของโลหะต่างๆ ด้วย ในรูปที่ 3.6 แสดงค่าความลึกในการผ่านเข้าสนามแม่เหล็กซึ่งแปรเปลี่ยนตามค่าความถี่



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสกับความลึกในการผ่านเข้าของสนามแม่เหล็ก

3.3.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด

การตรวจสอบด้วยวิธีใช้การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอาศัยขดลวดทำให้เกิดกระแสไหลวน ภายในชิ้นงาน แล้วตรวจหารอยบกพร่องในชิ้นงานโดยดูค่าแปรเปลี่ยนของกระแสไหลวนนั้น เนื่องจากข้อมูลที่วัดออกมาได้นั้นมาจากขดลวด จึงจำเป็นต้องรู้จักคุณสมบัติของอุปกรณ์ส่วนนี้ให้ดี ในวงจรกระแสสลับ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า I กับแรงดันไฟฟ้า V จะแสดงในรูปอิมพีแดนซ์ Z ดังนี้ คือ

$$Z = \frac{V}{I} \tag{3.3}$$

หน่วยที่ใช้เช่นเดียวกับหน่วยความต้านทานคือ โอห์ม (Ω) ค่าอินดัคแตนซ์ (Inductance) เป็น L_o (H : Henry) ค่าความถี่ของกระแสสลับคือ f (Hz) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวด

$$z_o = R_o + j\omega L_o \quad (\omega = 2\pi f \, ; \, j = \sqrt{-1}) \tag{3.4}$$

โดยที่

ค่า ωL_o นี้เรียกว่า ค่ารีแอคแตนซ์

ค่า L_o ของขดลวดชั้นเดียวหาได้ดังนี้

$$L_o = K \cdot \frac{\mu\pi a_0^{2} N^{2}}{\lambda} \ [H] \qquad (3.5)$$

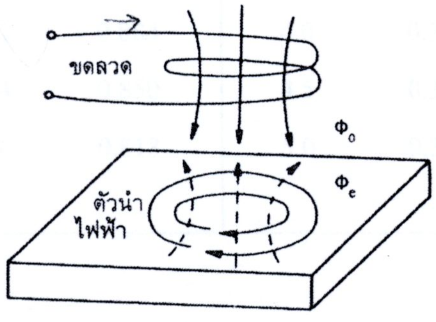
โดยที่ μ_o (H/m) เป็นค่าความซาบซึมได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ

a_o (m) เป็นค่ารัศมีของขดลวด

λ (m) เป็นค่าความยาวของขดลวด

N เป็นค่าจำนวนรอบของขดลวด

K เป็นค่าสัมประสิทธิ์นางาโอกา (Nagaoka s Ciefficient), ซึ่งแปรเปลี่ยนตามค่า $2a/\lambda$ ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2



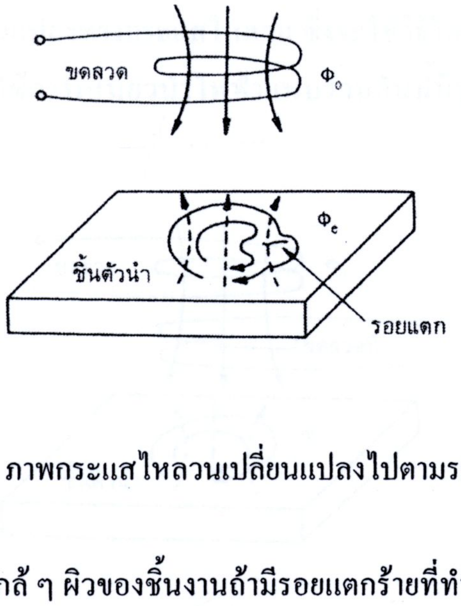
รูปที่ 3.7 ขดลวดที่ใช้ตรวจสอบโดยการเหนี่ยวนำด้วยตัวเอง

จากรูปที่ 3.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำขดลวดเข้าใกล้ชิ้นตัวนำ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลวนภายในชิ้นตัวนำจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดเปลี่ยนแปลงไป ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดนั้นเปรียบเทียบได้กับรูปแบบของหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งจะเข้าใจได้ง่าย นั่นคือ ในการต่อโหลดเข้ากับหม้อแปลงทางขดลวดทุติยภูมิ มีกระแสไหลมากขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้เมื่อนำมาพิจารณาเทียบกับขดลวดที่มีแรงดันไฟฟ้าคงที่ เมื่อนำเข้าใกล้ชิ้นตัวนำ จากผลของกระแสไหลวนทำให้กระแสที่ไหลในขดลวดมีมากขึ้น นั่นคือ ในสภาพที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ เมื่อค่า I เพิ่มมากขึ้นจากสูตรที่ 3.3 แสดงว่าค่าอิมพีแดนซ์จะลดลง นอกจากนี้กระแสไหลวนที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำในชิ้นตัวนำไฟฟ้า และค่าความซึมซาบได้ทางแม่เหล็กอีกด้วย ซึ่งในทำนองเดียวกันค่าของอิมพีแดนซ์ของขดลวดก็จะแปรเปลี่ยนไปตามตัวแปรเหล่านี้ด้วยเช่นกัน

ในกรณีที่ชิ้นตัวนำเป็นสารแม่เหล็กอยู่ด้วย คือมีค่า μ ใหญ่ จากสูตรที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าค่าอินดัคแตนซ์ที่เกิดจากกระแสไหลวนจะสูงกว่าค่าอิมพีแดนซ์ Z_o ของขดลวด

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์นางาโอกา

$\frac{2a}{\lambda}$	K	$\frac{2a}{\lambda}$	K	$\frac{2a}{\lambda}$	K	$\frac{2a}{\lambda}$	K
0	1.000	0.6	1.000	1.8	0.551	6	0.302
0.05	0.979	0.7	0.979	2.0	0.526	7	0.258
0.10	0.959	0.8	0.959	2.5	0.472	8	0.237
0.15	0.939	0.8	0.939	3.0	0.429	9	0.219
0.20	0.920	1.0	0.920	3.5	0.394	10	0.203
0.30	0.884	1.2	0.884	4.0	0.365	20	0.124
0.40	0.850	1.4	0.850	4.5	0.341	30	0.091
0.50	0.818	1.6	0.818	5.0	0.319	50	0.061



รูปที่ 3.8 ภาพกระแสไหลวนเปลี่ยนแปลงไปตามรอยร้าว

จากรูปที่ 3.8 ที่บริเวณใกล้ ๆ ผิวของชิ้นงานถ้ามีรอยแตกร้ายที่ทำไม่ให้เกิดการต่อเนื่องจะทำให้กระแสไหลวนมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ซึ่งสนามแม่เหล็กจากกระแสไหลวนจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดที่เข้าใกล้ชิ้นตัวนำแล้วตรวจพบว่าค่าอิมพีแดนซ์แปรเปลี่ยนไป ก็จะหารอยร้าวหรือรอยบกพร่องได้ ซึ่งลักษณะการตรวจสอบโดยหาค่าการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ในขดลวดนี้ เรียกว่า ขดลวดตรวจสอบแบบเหนี่ยวนำด้วยตนเอง ในการตรวจสอบโดยวิธีการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้านั้น การรู้ค่าการแปรเปลี่ยนของอิมพีแดนซ์สำคัญกว่าการรู้ค่าอิมพีแดนซ์จริงๆ ดังนั้น เวลาคิดค่าอิมพีแดนซ์จึงตัดส่วนค่าความต้านทานกระแสตรง R_o ของขดลวดซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับกระแสไหลวนออก ทำให้ค่า

อิมพีแดนซ์ของขดลวดเป็น ωL_o ถ้า Z เป็นอิมพีแดนซ์จริง และ Z_n เป็นอิมพีแดนซ์สัมพัทธ์ จะเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ

$$Z = R + j\omega L \tag{3.6}$$

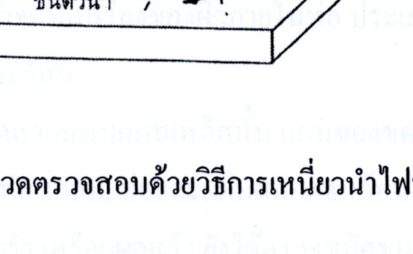
และ

$$Z = \frac{R - R_o}{\omega L_o} + j\frac{\omega L}{\omega L_o} \tag{3.7}$$

ในการแสดงรูปกราฟนั้นจะเขียน $(R-R_o)/\omega L_o$ ในแนวนอน $\omega L/\omega L_o$ ในแนวตั้ง

3.3.4 แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด

จากรูปที่ 3.9 เมื่อให้ขดลวดที่ 1 เข้าใกล้ขดลวดที่ 2 จะเกิดกระแสแม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดที่ 2 เมื่อนำขดลวดทั้ง 2 เข้าใกล้ชิ้นตัวนำกระแสไหลวนบนชิ้นตัวนำจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าคร่อมขดลวดที่ 2 แปรเปลี่ยนไป นั่นคือ ถ้าทำการตรวจหาค่าแปรเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าค่อมขดลวดที่ 2 ได้ ก็จะรู้ว่าการเปลี่ยนแปลงทางกระแสไหลวน ซึ่งจะใช้วิธีใดก็ตาม ผลทางการตรวจสอบไม่แตกต่างกัน ในวิธีการหาค่าโดยใช้การเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบร่วมกันนี้มีจุดดีคือ มีความยืดหยุ่นในการออกแบบขดลวดได้มากกว่า



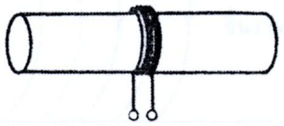
รูปที่ 3.9 ขดลวดตรวจสอบด้วยวิธีการเหนี่ยวนำไฟฟ้าร่วมกัน

3.4 วิธีการตรวจสอบ

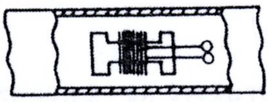
3.4.1 ขดลวดที่ใช้ตรวจสอบและวิธีการ

ขดลวดที่ใช้ในการตรวจสอบนั้น ทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลวนขึ้นในชิ้นงานทดสอบและตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลวนในชิ้นงานทดสอบนั้น ขดลวดทดสอบจะ

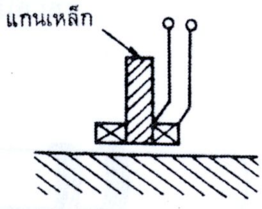
มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กันขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน แต่เมื่อแยกออกไปเป็นประเภทใหญ่ ๆ แล้ว จะได้แสดงดังรูปที่ 3.10 คือขดลวดแบบสวม ขดลวดแบบสอด และขดลวดแบบมีแกนเหล็ก



(ก) ขดลวดแบบสวม



(ข) ขดลวดแบบสอด



(ค) ขดลวดแบบมีแกนเหล็ก

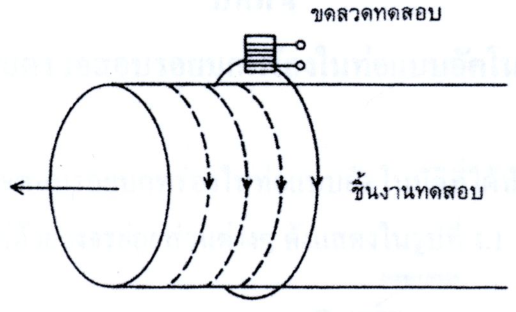
(ง)

รูปที่ 3.10 ขดลวดทดสอบแบบต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.10 (ก) นี้จะเห็นได้ว่าชิ้นงานทดสอบจะใส่ลอดผ่านขดลวด ชิ้นงานประเภทท่อ แท่งกลม หรือเส้นจะนำมาตรวจสอบได้ ซึ่งแบบนี้มีข้อดีที่ไม่ต้องแตะต้องกับชิ้นงาน หรือจุดรอยร้าวทำให้ตรวจได้เร็ว และมีประสิทธิภาพ

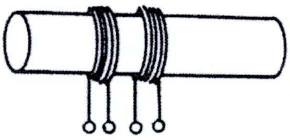
จากรูปที่ 3.10 (ข) เป็นแบบขดลวดสำหรับสอดเข้าไปภายในท่อจะมีรูปแบบขดลวดคล้าย ๆ กับ (ก) ซึ่งใช้ในการบำรุงรักษาในการตรวจหาจุดบกพร่องของผิวภายในท่อ ประเภทอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchance) หรือท่อถ่ายทอดความร้อน

จากรูปที่ 3.10 (ค) ซึ่งเป็นขดลวดแบบแกนเหล็กนั้น แกนของขดลวดจะตั้งฉากกับผิวของชิ้นงานทดสอบ ใช้ตรวจวัสดุที่มีลักษณะเป็นท่อนกลม, ท่อและแผ่นตลอดจนก้อนโลหะดิบ (Ingot) ได้โดยการแตะกับผิววัสดุ นอกจากจะใช้ตรวจหารอยร้าวหรือแผลแล้ว ยังใช้ตรวจชนิดของเนื้อวัสดุ ตลอดจนวัดความหนาของชั้นฟิล์มได้ รูปที่ 3.11 แสดงการใช้ขดลวดแบบมีแกนเหล็กในการตรวจหาแผลหรือรอยร้าวรอบ ๆ ผิวของท่อ โดยใช้วิธีแบบหมุนรอบชิ้นงาน

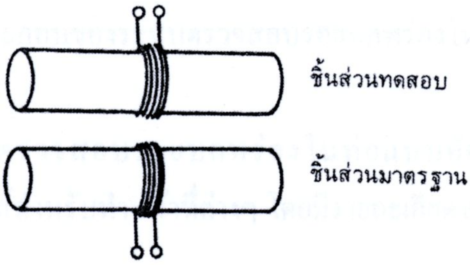


รูปที่ 3.11 การใช้ขดลวดแบบมีแกนเหล็กในลักษณะหมุนรอบท่อ

รูปที่ 3.12(ก) แสดงการวัดโดยใช้ขดลวด 2 ขด วางขนานกัน แล้วเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากขดลวดทั้งสอง แบบนี้จะใช้ในการตรวจหารอยร้าว สำหรับรูป 3.12(ข) นั้นเป็นการเปรียบเทียบกับชิ้นส่วนมาตรฐาน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ตรวจชนิดของเนื้อวัสดุ



(ก) แบบเหนี่ยวนำด้วยตัวเอง



(ข) แบบเปรียบเทียบกับชิ้นส่วนมาตรฐาน

รูปที่ 3.12 แบบของขดลวดทดสอบ