บทที่ ๓

การออกแบบ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>เป้าหมายการออกแบบ</u>

๑. ใช้ลับย่านความถี่ ๕๐ เมกกะเฮิร์ตขึ้นไป

๒. ต้องการค่าแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ ๕๐ โอห์ม

<u>การกำหนดความยาวของโคแอคเชียลสลอตเดดไลน์</u>

ในการออกแบบสร้างโคแอคเชียลสลอตเดดไลน์นั้น ต้องคำนึงถึงย่านความถี่ที่ใช้ทำการวิจัย เพราะต้องการที่จะอ่านค่า E min และ E max ของความถี่ต่ำสุดได้โดยตรงบนโคแอคเชียลสลอตเดดไลน์ ซึ่งจะพิจารณาได้จากความยาวคลื่น (Wave - length) ของความถี่ดังกล่าว

จากหัวข้อ ๑ ความถี่ ๕๐ เมกกะเฮิร์ตเป็นความถี่ต่ำสุด

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad \text{เมตร} \qquad (๓.๑)$$

เพื่อสะดวกในการพิจารณาให้อากาศเป็นตัวกลางตลอดความยาวของตัวนำทั้งสอง แทนค่าความเร็วแสงและความถี่ต่ำสุดในสมการ ๓.๑ ได้

$$\lambda = \frac{๓ \times ๑๐^{๘}}{๕๐ \times ๑๐^{๖}} \qquad \text{เมตร}$$

$$= ๖ \qquad \text{เมตร}$$

ในการที่จะอ่านค่า E min และ E max ได้โดยตรงบนโคแอคเชียลสลอตเดดไลน์ได้นั้น จะต้องมีความยาวต่ำสุด $\lambda/๒$ เพราะระยะห่างจาก E min ถึง E min หรือ

ระหว่าง E max ถึง E max เท่ากับ $\lambda/๒$ ซึ่งจะมีความยาวพอที่จะปรากฏตำแหน่ง E min และE max ของความถี่ต่ำสุดได้อย่างละ ๑ ตำแหน่ง

จากเหตุผลดังกล่าว ให้ความยาวของโคแอคเชียลสลอตเตดไลน์ที่สร้างขึ้นจะเท่ากับ ๓ เมตร ความยาวขนาดนี้นับว่ายาวมากกว่าที่ความแข็งแรงของโลหะจะทรงสภาพเดิมอยู่ได้ โดยมากมักจะโก่งเนื่องจากน้ำหนักของตัวมันเอง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้แบ่งโคแอคเชียลสลอตเตดไลน์ออกเป็น ๓ ท่อน ยาวท่อนละ ๑ เมตร และในการประกอบก็ใช้หัวต่อแบบต่าง ๆ ซึ่งจะได้กล่าวในตอนต่อไป

<u>การกำหนดขนาดของตัวนำทั้งสอง</u>

จากบทที่ ๒ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของสายโคแอคเชียลพบค่าขนาดของตัวนำทั้งสองมีผลต่อ Zo, αt, v และแบบแผนของคลื่น จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาเลือกขนาดตัวนำทั้งสองให้ได้ผลเป็นไปตามเป้าหมายของการออกแบบ

๑. ขนาดของตัวนำที่มีผลต่อ Zo และจากเป้าหมายของการออกแบบต้องการ

$$Zo = ๕๐ \text{ โอห์ม}$$

และจากสมการ ๒.๒

$$Zo = \frac{๑๓๘}{\sqrt{\epsilon r}} \log_{๑๐} b/a$$

$$b/a = ๒.๓ \qquad (๓.๒)$$

เพื่อสะดวกในการสร้างทำชิ้นงานจึงแสดงขนาดของตัวนำนอกที่มีขายในท้องตลาดในตารางที่ ๑

ตารางที่ ๑ ขนาดของตัวนำที่มีขายในท้องตลาด (ก) ประเภทกลมตัน

(ข) ประเภทกลมกลวง

ตัวนำใน		
เส้นผ่านศูนย์กลาง ม.ม	ความหนา ม.ม	ความยาว ม.
๓.๑	ตัน	๖
๔.๘	"	๖
๖.๒	"	๖
๘	"	๖
๙.๕	"	๖
๑๑.๑	"	๖
๑๒.๘	"	๖

(ก) ประเภทกลมตัน

ตัวนำนอก		
เส้นผ่านศูนย์กลาง ม.ม	ความหนา ม.ม	ความยาว ม.
๖.๒	๑.๖	๖
๙.๕	๑.๖	๖
๑๒.๘	๑.๖	๖
๑๕.๙	๑.๖	๖
๑๙.๒	๑.๖	๖
๒๓.๘	๑.๖	๖
๒๕.๓	๑.๖	๖

(ข) ประเภทกลมกลวง

จากตารางที่ ๑ ในการออกแบบ ได้กำหนดขนาดของตัวนำนอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน ๑๙.๒ มิลลิเมตร หนา ๑.๖ มิลลิเมตร เพราะเป็นขนาดที่ไม่เกิดปัญหาในการสร้างท่า และมีความแข็งแรงพอเมื่อเจาะร่องแล้วไม่บิดหรือขยายตัวออก

เมื่อกำหนดขนาดของตัวนำนอกได้จากตารางที่ ๑ และจากสมการ ๓.๒

สามารถที่จะกำหนดขนาดของตัวนำในได้

จาก $b/a = ๒.๓$

แต่ $b = \frac{๑๔.๒}{๒} = ๔.๖$ มิลลิเมตร

ดังนั้น $a = \frac{๔.๖}{๒.๓}$

$= ๔.๑๗๓๔๑๓$ มิลลิเมตร

ขนาดของตัวนำในที่ได้จากการคำนวณ (เมื่อกำหนดขนาดของตัวนำนอก) ปรากฏว่าไม่มีขายในท้องตลาด และไม่สามารถที่จะสร้างทำขึ้นได้ เพราะมีความยาวถึง ๓ เมตร ถ้านำขนาดที่ใหญ่กว่า จากการคำนวณมาทำการกลึงลดขนาดลง จะทำให้เกิดการดดงอได้ง่าย แต่ถ้านำมาตัดเป็นท่อน ๆ และสั้นพอที่จะทำการกลึงลดขนาดได้ ก็จะเกิดปัญหาตรงรอยต่อมีจำนวนมากไปจะเกิดการไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity) และจะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับคลื่นสะท้อนกลับจากสาเหตุดังกล่าว

ดังนั้น จึงพิจารณาเลือกขนาดที่มีอัตราส่วน b/a ที่มีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณไว้ และให้ Zo มีค่าใกล้เคียงกับความต้องการดังแสดงในตารางที่ ๒

004087

ตารางที่ ๒ การเลือกขนาดของตัวนำทั้งสอง

เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำใน (ม.ม)	เส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำนอก (ม.ม)	b/a	Zo (โอหม)
๓.๑	๖.๒	๒	๔๑.๕๔
๔.๘	๔.๕	๑.๔๗๔	๔๐.๔
๖.๒	๑๒.๘	๒.๐๖	๔๓.๓
๘	๑๕.๔	๑.๔๘	๔๐.๔
๔.๕	๑๔.๒	๒.๐๒	๔๒.๑๓
๑๑.๑	๒๓.๘	๒.๑๔	๔๕.๕๔
๑๒.๘	๒๕.๓	๑.๔๗	๔๐.๔
๓.๑	๔.๕	๓.๐๖	๖๔.๐๒๔
๔.๘	๑๒.๘	๒.๖	๕๗.๒๖
๖.๒	๑๕.๔	๒.๕๖	๕๖.๓๓
๘	๑๔.๒	๒.๔	๕๒.๔๖๗
๔.๕	๒๓.๘	๒.๕	๕๔.๔๑๕
๑๑.๑	๒๕.๓	๒.๒๗	๔๔.๑๓๑

จากตารางที่ ๒ จะพบว่ามีขนาดที่ควรเลือกพิจารณาดังนี้

๒ a	=	๔	มิลลิเมตร
๒ b	=	๑๔.๒	มิลลิเมตร
b/a	=	๒.๔	
Zo	=	๕๒.๔๖๗	โอห์ม

และ

๒ a	=	๑๑.๕	มิลลิเมตร
๒ b	=	๒๕.๑	มิลลิเมตร
b/a	=	๒.๒๗	
Zo	=	๔๔.๑๓๑	โอห์ม

ในการสร้างจริงนั้น โคแอคเชียลสลอตเคคไลน์ มีความยาวอย่างน้อย ๑ เมตร จึงจำเป็นต้องใส่ Supportors เป็นช่วง ๆ ซึ่งตรงที่ใส่ Supportors นั้น ความจุ (Capacitance) จะมีค่าเพิ่มขึ้น และจากสมการ ๒.๑ จะทำให้ Zo มีค่าลดลงนอกจากนี้การเซาะร่องก็มีความโน้มเอียงที่จะลดค่า Zo ด้วย

ดังนั้น ถ้าเลือกขนาดของตัวนำที่มีอัตราส่วน b/a = ๒.๒๗ Zo ของไลน์ที่สร้างเสร็จแล้วควรจะมีค่าน้อยกว่า และห่างไกล ๕๐ โอห์ม มากขึ้น

แต่ถ้าเลือก b/a = ๒.๔ Supportors จะทำให้ Zo มีค่าลดลง แต่จะมีค่าเข้าใกล้ ๕๐ โอห์ม มากขึ้น และอาจทำให้เท่ากับ ๕๐ โอห์ม ได้ ถ้าเลือกจำนวน Supportors และการเซาะร่องให้เหมาะสมพอดี

จากเหตุผลดังกล่าวจึงสามารถกำหนดขนาดของตัวนำทั้งสองไว้ดังนี้

a	=	๔ มิลลิเมตร
b	=	๙.๒ มิลลิเมตร
b/a	=	๒.๔

$$Z_o = ๕๒.๔๖๗ \text{ โอห์ม} \qquad (๓.๓)$$

<u>การพิจารณาขนาดของตัวนำทั้งสองที่กำหนดขึ้นและมีผลกับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในสายโคแอคเชียล</u>

๑. ความต้านทานของตัวนำ (Conductor Resistance)

การพิจารณาความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการกำหนดขนาดของตัวนำทั้งสองเพื่อนำไปพิจารณาเกี่ยวกับการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นจากตัวนำ จากหัวข้อความต้านทานของตัวนำ, สมการ ๒.๕, จากตารางที่ ๑ และ ๒ เป็นขนาดของโลหะทองแดงซึ่งมีความต้านทานเป็น

$$R = ๔.๑๔ \times ๑๐^{-๖}\sqrt{f} \times (๑/a + ๑/b) \text{ โอห์ม/เมตร} \qquad (๒.๕)$$

ในการวิจัยใช้ย่านความถี่ ๕๐ ถึง ๑๕๐ เมกกะเฮิร์ตเป็นหลัก จากย่านความถี่ดังกล่าวความถี่สูงสุดจะให้ค่าความต้านทานมากที่สุด ดังในสมการ ๒.๕

เพราะฉะนั้นความต้านทานสูงสุด

$$R_{max} = ๔.๑๔ \times ๑๐^{-๖} \times \sqrt{๑๕๐ \times ๑๐^{๖}} \times (๑/๔ + ๑/๔.๖)$$

$$= ๐.๐๑๗๔๕๗๔ \text{ โอห์ม/เมตร}$$

$$= ๐.๐๕๓๔๗๓๑ \text{ โอห์ม/๓ เมตร} \qquad (๓.๔)$$

เมื่อนำสมการ ๓.๔ ไปเปรียบเทียบกับสมการ ๓.๓ จะเห็นว่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากขนาดของตัวนำทั้งสองและความยาวที่กำหนดขึ้นมานั้น มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ Z_o ในสมการ ๓.๓ หมายความว่าการสูญเสียพลังงานจากความต้านทานจะมีค่าน้อยมากจนไม่ต้องสนใจได้

๒.๒ การพิจารณาความลึกที่ผิว (Skin Depth)

จากสมการ ๒.๑๐ โดยใช้โลหะทองแดง

$$\delta_s = \frac{๒.๖๑}{\sqrt{f}} \quad \text{เซนติเมตร}$$

ที่ $f = ๕๐$ เมกกะเฮิร์ต ซึ่งเป็นความถี่ต่ำสุดในย่านที่ทำการวิจัย

ดังนั้นความหนาของผิวสูงสุด

$$\delta_{s_{max}} = \frac{๒.๖๑}{\sqrt{๕๐ \times ๑๐^{๖}}} \quad \text{เซนติเมตร}$$

$$= ๐.๐๐๔๓๕ \quad \text{มิลลิเมตร}$$

เมื่อนำค่าของความลึกผิวที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับความหนาของตัวนำนอก จะเห็นว่าตัวนำนอกมีความหนามากกว่าความลึกของผิวมาก จึงทำให้ความหนาของตัวนำนอกไม่มีผลต่อการกระจายของคลื่นในสายนี้

๓. การบั่นทอนพลังงาน (Attenuation)

เมื่อพิจารณาจากสมการ ๒.๑๑ การบั่นทอนพลังงานที่เกิดขึ้นจากตัวนำ

$$\alpha_c = ๑๓.๖ \frac{\delta_s}{\lambda b} \times (๑ + b/a) \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\ln b/a} \quad \text{ดี.บี/มิลลิเมตร}$$

แทนค่า

$f = ๑๕๐$ เมกกะเฮิร์ต

$\lambda = ๒$ เมตร

ให้

$$\alpha_c = ๐.๐๙๙๑๖๒๗ \quad \text{ดี.บี/ ๓ เมตร} \qquad (๓.๕)$$

ในการออกแบบใช้ Teflon ซึ่งมีค่าคงที่ของไดอิเล็คตริค

$$\epsilon_r = ๒.๑ \qquad (๓.๖)$$

เป็นตัวกลางทำหน้าที่ inner - conductor supportor สมการ ๒.๑๒ ให้ค่าปั่นทอนพลังงานที่เกิดจากตัวกลางเป็น

$$\alpha_d = \frac{๒๗.๓ \times \sqrt{๒.๑} \tan ๐.๐๐๔๓๕}{๒,๐๐๐}$$

$$= ๒.๔๐๘๒๖ \times ๑๐^{-๖} \quad \text{นี.บี/มิลลิเมตร}$$

ในงานจริง ๆ ได้ใช้ Teflon ทำเป็นแผ่นบาง ๆ (Beads) หนาแผ่นละ ๓ มิลลิเมตร ใช้ประมาณ ๑๒ อัน ดังนั้น จะมีความยาวทั้งหมด ๓๖ มิลลิเมตร เพราะฉะนั้น

$$\alpha_d = ๑.๐๔๖๔๗ \times ๑๐^{-๔} \quad \text{นี.บี/๓๖ มิลลิเมตร} \qquad (๓.๗)$$

จากสมการ ๒.๑๓, ๓.๕ และ ๓.๗ จะได้

$$\alpha_t = ๐.๐๙๗๑๖๒๗ + ๑.๐๔๕๘๖ \times ๑๐^{-๔}$$

$$= ๐.๐๙๗๒๖๓๓ \quad \text{นี.บี}$$

$$= ๐.๐๐๘๔๐๑๗๖ \quad \text{เนเปอร์} \qquad (๓.๘)$$

เมื่อนำการสูญเสียพลังงานทั้งหมดดังสมการ ๓.๘ ไปเปรียบเทียบกับพลังงาน ๑ เนเปอร์ จะมีค่าน้อยมาก แสดงว่าในการกำหนดขนาดและชนิดของตัวนำและตัวกลางมีการสูญเสียพลังงานน้อยมาก ดังนั้นแบบแผนของคลื่นมีลักษณะใกล้เคียงกับคลื่นแบบ ที.อี.เอ็ม (T E M)

๔. การพิจารณาความเร็วเฟส (Phase Velocity) ที่มีผลจากการกำหนดขนาดของตัวนำทั้งสอง

จากสมการ ๒.๓

$$L = ๐.๒ \ln ๒.๔ \quad \text{ไมโครเฮนรี่/เมตร}$$

$$= ๐.๑๗๕๐๔๓๗ \quad \text{ไมโครเฮนรี่/เมตร}$$

จากสมการ ๒.๔

$$C = \frac{๕๕.๕ \times ๑}{\ln ๒.๔}$$

$$= ๖๓.๓๔๔๖๐๔ \quad \text{พิโคฟาหรัด/เมตร}$$

จากสมการ ๒.๗

$$v = \frac{๑}{\sqrt{LC}} \quad \text{เมตร/วินาที}$$

แทนค่า L และ C จะได้

$$v = \frac{๑}{\sqrt{๐.๑๗๕๐๔๓๗ \times ๖๓.๓๔๔๖๐๔ \times ๑๐^{-๖} \times ๑๐^{-๑๒}}}$$

$$= ๓.๐๐๐๑๕๑๔ \times ๑๐^{๘} \quad \text{เมตร/วินาที} \qquad (๓.๔)$$

จากสมการ ๓.๔ เห็นว่าความเร็วเฟสที่คำนวณได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วแสงมาก

แต่ในการสร้างจริงใช้ Teflon ทำเป็นแผ่นบาง ๆ (Beads) ใส่ไว้เป็นช่วง ๆ ตามวัตถุประสงค์ได้กล่าวแล้วตอนต้น อาจจะมีผลทำให้ความเร็วเฟสลดลง ความยาวคลื่นลดลง และจะทำให้ Zo ลดลง (เพราะตรงที่ใส่ Supportors นั้นค่าความจุจะเพิ่มขึ้น) ซึ่งในการออกแบบไม่สามารถที่กำหนดจำนวน Supportors และขนาดได้ต้องอาศัยการทดสอบ โดยการเปลี่ยนจำนวน Supportors ต่อช่วงความยาวไปจนกว่าจะได้จำนวนที่ให้ค่าผิดพลาด (Error) เกี่ยวกับรูปคลื่นยืน (Standing Wave)

ความยาวช่วงคลื่น (λ), VSWR และ Zo น้อยที่สุด

๕. การพิจารณาค่าแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของโคแอคเชียลสลอตเคคไลน์ (Coaxial Slotted Line Characteristic Impedance)

จากหัวข้อ ค่าแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของโคแอคเชียลสลอตเคคไลน์ การกำหนดความกว้างของร่องที่เซาะบนผิวของตัวนำนอกต้องให้มีความกว้างน้อยที่สุด เพราะไม่ต้องการให้เกิดการสูญเสียพลังงานอันเนื่องจากการแผ่กระจาย (Radiation Loss) แต่ในการสร้างจริงต้องขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องจักรเป็นส่วนประกอบที่จะนำมาพิจารณาด้วย และในการสร้างจริงสามารถที่จะทำการเซาะร่องได้แคบที่สุด ๒.๓ มิลลิเมตร

จากสมการ ๒.๑๔, ๒.๑๕ และ ๓.๓

$$\frac{\Delta Zo}{Zo} \qquad \frac{1}{4\pi^2} \qquad \frac{W^2}{R_2^2 - R_1^2} \qquad (๒.๑๔)$$

แทนค่า W = ๒.๓ มิลลิเมตร

Zo = ๕๒.๔๖๗ โอห์ม

$$\Delta Zo = \frac{๕๒.๔๖๗}{4\pi^2} \times \frac{๒.๓^2}{๔.๖^2 - ๔^2} \quad \text{โอห์ม}$$

$$= ๐.๐๔๒๓ \quad \text{โอห์ม}$$

จากสมการ ๒.๑๕

$$Z\acute{o} = ๕๒.๔๖๗ - ๐.๐๔๒๓$$

$$= ๕๒.๓๙๔๗ \quad \text{โอห์ม} \qquad (๓.๑๐)$$

จากการกำหนดขนาดของร่องที่เซาะทำให้ค่าแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก ซึ่งจะได้ค่าแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของโคแอคเชียลสลอตเคคไลน์จริง ๆ

$$Z\acute{o} = ๕๒.๓๙๔๗ \quad \text{โอห์ม}$$

สรุปการออกแบบโคแอคเชียลสลอตเคคไลน์

๑. จากหัวข้อ การกำหนดความยาวของโคแอคเชียลสลอตเคคไลน์, การกำหนดขนาดของตัวนำทั้งสอง, การพิจารณาขนาดของตัวนำทั้งสองที่กำหนดขึ้นและมีผลกับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในสายโคแอคเชียล มีความยาว ๓ เมตร

๒. มีคาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ ๕๒.๓๙๔ โอห์ม

๓. มีแบบแผนของคลื่น (Mode) ใกล้เคียงกับคลื่นแบบ ที.อี.เอ็ม จากเหตุผลในหัวข้อ ความต้านทานของตัวนำ และการบั่นทอนพลังงาน