หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ ๒

การศึกษาคุณสมบัติของสายโคแอคเชียล

<u>วัตถุประสงค์</u>

เนื่องจากในการวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างของโคแอคเชียลสลอตเคดไลน์ (Coaxial Slotted Line) จึงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติของสายโคแอคเชียล เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสร้างและให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย

<u>คุณสมบัติของสายโคแอคเชียล</u>

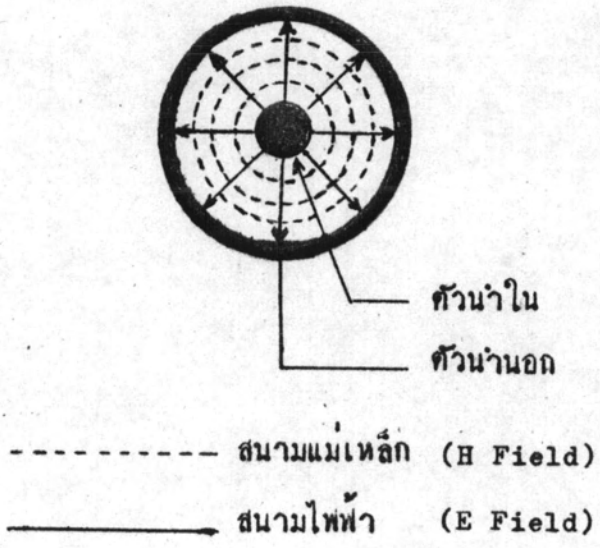
สายโคแอคเชียลเป็นสายส่งพลังงานชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบขึ้นด้วยตัวนำนอก (Outer Conductor) วางซ้อนกับตัวนำใน (Inner Conductor) โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางร่วมกัน ดังนั้นในการที่จะกำหนดขนาดของตัวนำทั้งสอง และส่วนประกอบอื่น ๆ เพื่อจะสร้างชิ้นงานดังกล่าวจึงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติของสายโคแอคเชียลดังนี้

๑. แบบแผนของคลื่น (Mode) ภายในโคแอคเชียล
๒. คาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance)
๓. ความต้านทานของตัวนำ (Resistance)
๔. ความเร็วเฟส (Phase Velocity)
๕. ผลที่ผิว (Skin Effect)
๖. การบั่นทอนพลังงาน (Attenuation)
๗. คาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของโคแอคเชียลสลอตเคดไลน์ (Coaxial Slotted Line Characteristic Impedance)

<u>แบบแผนของคลื่น (Mode) ภายในโคแอคเชียล</u>

เมื่อคลื่นวิทยุหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกส่งผ่านไปตามสายโคแอคเชียล โดยทั่วไปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีแบบแผนเป็นแบบคลื่นตามขวางทั้งสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า (Transverse Electromagnetic Wave) หรือเรียกว่า ที อี เอ็ม (T E M) เมื่อสายส่งนั้นไม่มีการสูญเสียพลังงานเลย แต่ในทางปฏิบัติตัวนำทั้งสองทำด้วยโลหะ ซึ่งมีขนาดและความยาว โดยเฉพาะระหว่างตัวนำทั้งสองจะต้องมีแผ่นฉนวนเป็นตัวกลางรักษาระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสองให้เท่ากันตลอด จากขนาดและชนิดของตัวนำทั้งสองและตัวกลาง เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายโคแอคเชียล เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดขนาดของตัวนำทั้งสองและตัวกลางในการสร้างทำชิ้นงาน เพื่อให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด ลักษณะแบบแผนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ที อี เอ็ม ปรากฏดังแสดงในรูปที่ ๑

รูปที่ ๑ แสดงแบบแผนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ ที.อี.เอ็ม



<u>คาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของสายโคแอคเชียล</u> (Coaxial Characteristic Impedance)

คาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของสายส่งเป็นอิมพีแดนซ์เฉพาะของสายแต่ละชนิดและขนาด โดยไม่ขึ้นอยู่กับความยาวและถ้าเป็นสายส่งที่ไม่การสูญเสียพลังงานเลย ก็จะไม่ขึ้นอยู่กับความถี่แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของตัวนำทั้งสอง ดังนั้นในการศึกษาเกี่ยวกับคาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ ก็เพื่อจะนำไปกำหนดขนาดและชนิดของตัวนำทั้งสอง เพื่อให้มีคาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์เป็นไปตามเป้าหมายของการออกแบบสร้าง และให้มีแบบแผนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ ที อี เอ็ม

จากแบบแผนของคลื่นภายในโคแอคเชียล ถ้าต้องการให้แบบแผนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบ ที อี เอ็ม Gershon J. Wheeler ได้กำหนดไว้ [๒]

$$Z_o = \sqrt{L/C} \quad \text{โอห์ม} \qquad (๒.๑)$$

หรือ

$$Z_o = \frac{๑๓๘}{\sqrt{\epsilon_r}} \log_{๑๐} b/a \quad \text{โอห์ม} \qquad (๒.๒)$$

จากสมการ ๒.๑ และ ๒.๒

Z_o = คาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของสายโคแอคเชียล

L = อินดัคแตนซ์ (Inductance) ของสายโคแอคเชียลมีหน่วยเป็นไมโครเฮนรี่/เมตร

C = คาพาซิแตนซ์ (Capacitance) ของสายโคแอคเชียลมีหน่วยเป็นพิโคฟาหรัด/เมตร

ϵ_r = ค่าคงที่ไดอิเลคตริคสัมพัทธ์

a = รัศมีของตัวนำใน

b = รัศมีของตัวนำนอก

ค่าของ L และ C ในสมการ ๒.๑ นั้น [๒] ได้กำหนดเป็น

$$L = 0.6b \ \mathrm{Log}_{10} b/a$$

$$= 0.2 \ \ln b/a \quad \text{ไมโครเฮนรี่/เมตร} \qquad (๒.๓)$$

$$C = \frac{24.1 \epsilon_r}{\log_{10} b/a}$$

$$= \frac{55.6 \epsilon_r}{\ln b/a} \quad \text{พิโคฟาหรัด/เมตร} \qquad (๒.๔)$$

<u>ความต้านทานของตัวนำ</u> (Conductor Resistance)

เนื่องจากตัวนำทั้งสองทำด้วยโลหะที่มีขนาดและความยาวก็ต้องมีความต้านทาน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานอันจะมีผลกับแบบแผนของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายส่งที่สร้างขึ้น

จากการกำหนดขนาดและชนิดของตัวนำทั้งสองดังในสมการ ๒.๒ ถ้าตัวนำทั้งสองทำด้วยโลหะทองแดง [๒] ให้สมการของความต้านทานเป็น

$$R = 8.28 \times 10^{-6} \times \sqrt{f} \times (1/a + 1/b) \quad \text{โอห์ม/เมตร} \qquad (๒.๕)$$

โดยที่

R = ความต้านทาน

f = ความถี่ที่จะทำให้เกิดค่า R มากที่สุดของย่านความถี่ที่ทำการวิจัย

จากสมการ ๒.๕ พบว่าความต้านทานของตัวนำขึ้นอยู่กับความถี่และขนาดของตัวนำทั้งสอง การกำหนดขนาดและชนิดของตัวนำทั้งสองจึงมีความสำคัญต่อความต้านทานด้วย

<u>แหวนยึดตัวนำใน</u> (Inner Conductor Supportors)

ในกรณีที่สายโคแอคเชียลใช้อากาศเป็นตัวกลาง (Air Dielectric) ตลอดความยาว ความเร็วเฟสของคลื่นจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วแสง แต่ถ้าตัวกลางใช้ฉนวนอื่นตลอดความยาว ก็จะทำให้ความเร็วลดลง ขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของตัวกลางที่ใช้ ดังใน [๒] ได้กำหนดไว้เป็น

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{เมตร/วินาที} \qquad (๒.๖)$$

โดยที่

v = ความเร็วของคลื่นที่ผ่านตัวกลาง

c = ความเร็วแสง

ϵ_r = ค่าคงที่ไดอิเลคตริคสัมพัทธ์

จากแบบแผนของคลื่นภายในโคแอคเชียล ในกรณีที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานเลย จะได้

$$v = \frac{\cdot}{\sqrt{L\ C}} \quad \text{เมตร/วินาที} \qquad (๒.๗)$$

หารสมการ ๒.๖ ด้วยความถี่จะได้สมการ ๒.๘

$$\lambda_d = \frac{\lambda_o}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{เมตร} \qquad (๒.๘)$$

โดยที่

λ_d = ความยาวคลื่นในตัวกลาง

λ_o = ความยาวคลื่นที่มีอากาศเป็นตัวกลาง

จากสมการ ๒.๖, ๒.๗ และ ๒.๘ จะเห็นว่าความเร็วหรือความยาวคลื่นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดและชนิดของตัวกลางที่ใช้ ดังนั้นในการศึกษาระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง (Supportors) เราต้องการศึกษา เพราะในการสร้างโคแอคเชียลสลอตเคดไลน์จริง ๆ นั้นจำเป็นต้องใส่ตัวกลางเป็น Supportors ไว้เป็นช่วง ๆ

<u>ผลที่ผิวของตัวนำ</u> (Skin Effect)

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางเข้าไปในสายส่งซึ่งประกอบด้วยตัวนำทั้งสอง ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลที่ผิวของตัวนำทั้งสอง และจะไหลลึกลงไปในเนื้อของตัวนำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาเพื่อไปกำหนดความหนาของตัวนำทั้งสองให้มีความหนาเพียงพอกับความลึกที่กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไป William H. Hayt, Jr. ได้กำหนดความลึกของผิว (Skin Depth) [๓] ไว้เป็น

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad \text{เมตร} \qquad (๒.๙)$$

จากสมการ ๒.๙ พบว่าความลึกของผิวที่กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาใช้เป็นตัวนำ และความถี่ที่จะนำไปใช้งาน

ในกรณีที่ตัวนำทั้งสองเป็นทองแดง ซึ่งมี Conductivity (σ) ๕.๘×๑๐^{๗} โมห์/เมตร ค่าความลึกผิว [๓] ได้กำหนดไว้เป็น

$$\delta_s = \frac{๖.๖๑}{\sqrt{f}} \quad \text{เซนติเมตร} \qquad (๒.๑๐)$$

<u>การบั่นทอนพลังงาน</u> (Attenuation)

การบั่นทอนพลังงานในสายโคแอคเชียล มีสาเหตุหลายประการ คือ

๑. การบั่นทอนพลังงานที่เกิดขึ้นจากตัวนำ (Conductor Loss) อันเนื่องจากความต้านทานของตัวนำเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

๒. การบั่นทอนพลังงานที่เกิดจากตัวกลาง (Dielectric Loss) ที่นำไปใส่เพื่อรักษาระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง

การบั่นทอนพลังงานที่เกิดจากตัวนำ (Conductor Loss) [๒] ได้กำหนดไว้เป็น

$$\alpha_c = ๑๓.๖ \frac{\delta_s}{\lambda_b} \left(๑ + {}^{b}/_{a}\right) \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\ln {}^{b}/_{a}} \text{ ดีบี/เมตร} \quad (๒.๑๑)$$

การบั่นทอนพลังงานที่เกิดจากตัวกลาง (Dielectric Loss) [๒] ได้กำหนดไว้เป็น

$$\alpha_d = ๒.๓๓ \sqrt{\epsilon_r} \frac{\tan \delta_s}{\lambda} \text{ ดีบี/เมตร} \quad (๒.๑๒)$$

เพราะฉะนั้น การบั่นทอนพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นในสายส่งคือ

$$\alpha_t = \alpha_c + \alpha_d \text{ ดีบี/เมตร} \quad (๒.๑๓)$$

จากสมการจะเห็นว่าการบั่นทอนพลังงานที่เกิดขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับขนาดของตัวนำทั้งสอง ความลึกที่ผิว ชนิดของตัวกลางและความถี่ที่ใช้

<u>คาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของโคแอคเชียลสลอตเตดไลน์</u> (Coaxial Slotted Line Characteristic Impedance)

เนื่องจากในการสร้างโคแอคเชียลสลอตไลน์นั้น ต้องทำการเจาะร่องที่ผิวของตัวนำนอกเพื่อให้ Detector Probe เคลื่อนที่ผ่านไปได้ตลอดความยาวที่กำหนดขึ้น เราต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของสายโคแอคเชียล เมื่อทำการเจาะร่องแล้ว เพื่อนำไปกำหนดความกว้างของร่อง

Carol G. Montgomery [๔] ได้ให้ค่าเปลี่ยนแปลงของ Characteristic Impedance ไว้ดังสมการ (๒.๑๔)

$$\frac{\Delta Z_o}{Z_o} = \frac{๑}{๔\pi^{๒}} \frac{W^{๒}}{R_{๒}^{๒} - R_{๑}^{๒}} \quad (๒.๑๔)$$

จะได้ Characteristic Impedance ของโคแอคเชียลสลอตเคคไลน์ดังนี้

$$Z_o' = Z_o - \Delta Z_o \quad \text{โอห์ม} \qquad (๒.๑๕)$$

โดยที่

ΔZ_o = คาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงไป

Z_o = คาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของสายโคแอคเชียล

$R_1 = a$ = รัศมีของตัวนำใน

$R_2 = b$ = รัศมีด้านในของตัวนำนอก

W = ความกว้างของร่อง

Z_o' = คาแรคเตอริสติคอิมพีแดนซ์ของโคแอคเชียลสลอตเคคไลน์