

วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง

ความนำ

วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางได้เสนอขึ้นโดย Angkaew และคณะ ใน ค.ศ. 1987 โดยมีวัตถุประสงค์คือ เสนอวิธีที่มีความสามารถในการกำจัดผลเฉลยปลอมเทียม และแก้ไขข้อบกพร่องของนิพจน์แปรผัน ซึ่งที่จุดต่ำสุดของนิพจน์แปรผันนี้จะให้ความถี่เชิงมุม ω เป็นคำตอบเมื่อระบุค่าคงตัวเฟส β ทำให้วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่อาศัยนิพจน์นี้ไม่สามารถวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟได้ ขั้นตอนของวิธีนี้เริ่มจากการจัดรูปสมการของแมกซ์เวลล์ ให้อยู่ในรูปเฉพาะองค์ประกอบตามขวาง จากนั้นทำการจัดรูปนิพจน์แปรผันของสมการแมกซ์เวลล์ ซึ่งนิพจน์แปรผันจะอยู่ในรูปสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง คุณลักษณะการแพร่กระจายของท่อนำคลื่นสามารถหาได้จากการพิจารณาจุดต่ำสุดของนิพจน์แปรผันนี้

เนื่องจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่เสนอโดย Angkaew และคณะ (1987) เป็นวิธีที่มีการยอมรับอย่างกว้างขวาง รวมถึงเป็นวิธีที่ใช้กับนิพจน์แปรผันต่างจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนาม 3 องค์ประกอบ และวิธีที่ใช้สนามตามขวาง 2 องค์ประกอบ ซึ่งเสนอโดย Koshiba และคณะ (1985ก) และ Hayata และคณะ (1986) ตามลำดับ ดังที่ได้ศึกษามาแล้วในบทที่ 2 ถึงบทที่ 5 ในบทนี้ผู้เสนอวิทยานิพนธ์จะนำวิธีนี้มาศึกษาว่า สามารถวิเคราะห์ท่อนำคลื่น 4 ประเภท ต่อไปนี้ได้หรือไม่

1. ท่อนำคลื่นแบบไอโซทรอปิกไม่เอกพันธ์
2. ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง
3. ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็กที่แทนเซอร์ความซาชิมได้ $[\mu]$ อยู่ในรูป

ดังนี้

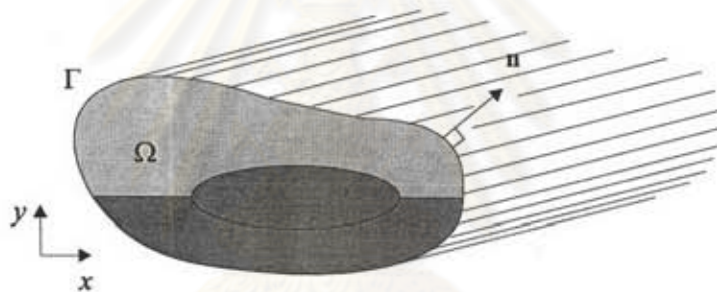
$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & 0 & \mu_{xz} \\ 0 & \mu_{yy} & 0 \\ \mu_{zx} & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix}$$

4. ท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้าที่เทนเซอร์สภาพยอม $[\varepsilon]$ อยู่ในรูปดังนี้

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \text{ และ } [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

นิพจน์แปรผัน

Angkaew และคณะ (1987) ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่ไม่มีการสูญเสีย และมีความสม่ำเสมอในแนวแกน z ที่มีภาคตัดขวางรูปทรงใดๆ Ω ในระนาบ xy โดยขอบเขตของ Ω คือ Γ ดังแสดงในรูป 7.1



รูป 7.1 ท่อนำคลื่นที่มีภาคตัดขวางรูปทรงใดๆ และมีความสม่ำเสมอในแนวแกน z

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในท่อนำคลื่นสามารถวิเคราะห์ได้จากสมการของแมกซ์เวลล์รูปฮาร์มอนิกในบริเวณที่ไม่มีแหล่งกำเนิด คือ

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega[\mu] \cdot \mathbf{H} \quad (7.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega[\varepsilon] \cdot \mathbf{E} \quad (7.2)$$

เมื่อ ω คือความถี่เชิงมุม, $[\varepsilon]$ และ $[\mu]$ คือ เทนเซอร์สภาพยอม และเทนเซอร์ความซบซิมได้ ของตัวกลาง ตามลำดับ โดยให้เทนเซอร์สภาพยอมและเทนเซอร์ความซบซิมได้ อยู่ในรูปเฮอริมิเซียนดังนี้

$$[\varepsilon] = [\varepsilon]^*T = \begin{bmatrix} [\varepsilon_{xx}] & [\varepsilon_{xy}] \\ [\varepsilon_{yx}] & [\varepsilon_{yy}] \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

$$[\mu] = [\mu]^*T = \begin{bmatrix} [\mu_{tt}] & [\mu_{tz}] \\ [\mu_{zt}] & [\mu_{zz}] \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

เมื่อ * และ T คือสังยุคเชิงซ้อน และตัวสลับเปลี่ยน ตามลำดับ ตัวชี้ล่าง tt,tz,zt และ zz หมายถึงอันดับของเมตริกซ์ย่อยซึ่งมีค่าเป็น 2×2, 2×1, 1×2 และ 1×1 ตามลำดับ

สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และตัวดำเนินการเดล (∇) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปองค์ประกอบตามขวางและองค์ประกอบในแนวแกน z ได้เป็น

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_t + \mathbf{E}_z = \mathbf{E}_t + E_z \mathbf{a}_z \quad (7.5)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_t + \mathbf{H}_z = \mathbf{H}_t + H_z \mathbf{a}_z \quad (7.6)$$

$$\nabla = \nabla_t - j\beta \mathbf{a}_z \quad (7.7)$$

เมื่อ \mathbf{E} , และ \mathbf{H} , คือสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กในแนวตามขวาง, \mathbf{a}_z คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศ z ,

β คือค่าคงตัวเฟส และ $\nabla_t = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{a}_x + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{a}_y$

โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (7.5) ถึง (7.7) สมการ (7.1) และ (7.2) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปองค์ประกอบในแนวตามขวางได้เป็น

$$\omega[\epsilon_{tt}] \cdot \mathbf{E}_t + \omega[\epsilon_{tz}] \cdot \mathbf{E}_z + j\nabla_t \times \mathbf{H}_z + \beta \mathbf{a}_z \times \mathbf{H}_t = 0 \quad (7.8a)$$

$$\omega[\mu_{tt}] \cdot \mathbf{H}_t + \omega[\mu_{tz}] \cdot \mathbf{H}_z - j\nabla_t \times \mathbf{E}_z - \beta \mathbf{a}_z \times \mathbf{E}_t = 0 \quad (7.8b)$$

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวแกน z สามารถเขียนให้อยู่ในรูปองค์ประกอบตามขวางได้เป็น

$$\mathbf{E}_z = \frac{1}{j\omega\epsilon_{zz}} (\nabla_t \times \mathbf{H}_t - j\omega[\epsilon_{zz}] \cdot \mathbf{E}_t) \quad (7.9a)$$

$$\mathbf{H}_z = -\frac{1}{j\omega\mu_{zz}} (\nabla_t \times \mathbf{E}_t + j\omega[\mu_{zz}] \cdot \mathbf{H}_t) \quad (7.9b)$$

ฟังก์ชันนอลที่มีคุณสมบัติเป็นนิพจน์แปรผันสำหรับสมการ (7.8) คือ

$$\beta(\mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t) = \frac{A(\mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t)}{B(\mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t)} \quad (7.10)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } A(\mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t) = & \iint [\mathbf{E}_t^* \cdot \omega[\varepsilon_{zz}] \cdot \mathbf{E}_t + \mathbf{H}_t^* \cdot \omega[\mu_{zz}] \cdot \mathbf{H}_t - \frac{1}{\omega\mu_{zz}} (\nabla_t \times \mathbf{E}_t + j\omega[\mu_{zz}] \cdot \mathbf{H}_t)^* \\ & \cdot (\nabla_t \times \mathbf{E}_t + j\omega[\mu_{zz}] \cdot \mathbf{H}_t) - \frac{1}{\omega\varepsilon_{zz}} (\nabla \times \mathbf{H}_t - j\omega[\varepsilon_{zz}] \cdot \mathbf{E}_t)^* \\ & \cdot (\nabla \times \mathbf{H}_t - j\omega[\varepsilon_{zz}] \cdot \mathbf{E}_t)] d\Omega \end{aligned} \quad (7.11)$$

$$B(\mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t) = \iint [\mathbf{a}_z \cdot (\mathbf{E}_t^* \times \mathbf{H}_t + \mathbf{E}_t \times \mathbf{H}_t^*)] d\Omega \quad (7.12)$$

วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์

แบ่งภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็นอีลีเมนต์รูปสามเหลี่ยม และให้คำตอบทดลองของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแต่ละอีลีเมนต์ มีค่าดังสมการ (Angkaew, 1987)

$$\mathbf{E}_t = \sum_{m=1}^6 \mathbf{N}_m \phi_m = \{\mathbf{N}\}^T \{\phi_m\} \quad (7.13a)$$

$$\mathbf{H}_t = \sum_{m=1}^6 \mathbf{N}_m \psi_m = \{\mathbf{N}\}^T \{\psi_m\} \quad (7.13b)$$

$$\text{โดยที่ } \{\mathbf{N}\} = [\mathbf{N}_1 \quad \mathbf{N}_2 \quad \mathbf{N}_3 \quad \mathbf{N}_4 \quad \mathbf{N}_5 \quad \mathbf{N}_6]^T \quad (7.14)$$

แทนสมการ (7.13) ในสมการ (7.10) จากนั้นทำการรวมทุกอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นเข้าด้วยกัน สมการ (7.10) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\beta = \frac{\{\xi\}^{*T} [P] \{\xi\}}{\{\xi\}^{*T} [Q] \{\xi\}} \quad (7.15)$$

เมื่อ $\{\xi\}$ คือเวกเตอร์แถวตั้งที่ประกอบด้วยตัวแปรไม่ทราบค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ใช้ทั้งหมดบนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น $[P]$ คือเมตริกซ์เฮอริมิเชียน

$$\{\xi\} = \begin{bmatrix} \{\phi\} \\ \{\psi\} \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

$$[P] = \begin{bmatrix} [P_{11}] & [P_{12}] \\ [P_{21}] & [P_{22}] \end{bmatrix} \quad (7.17)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} [0] & [Q_{12}] \\ [Q_{21}] & [0] \end{bmatrix} \quad (7.18)$$

คุณลักษณะการแพร่กระจายของท่อนำคลื่นสามารถหาได้จากการพิจารณาจุดต่ำสุดของสมการ (7.15) ซึ่งยังผลให้ได้สมการที่อยู่ในรูปเมตริกซ์ของปัญหาค่าเจาะจงทั่วไป ดังนี้

$$[Q]\{\xi\} = \frac{1}{\beta}[P]\{\xi\} \quad (7.19)$$

สำหรับกรณีที่ $[\varepsilon_x] = [\mu_x] = [0]$ เมตริกซ์ย่อย $[P_{12}]$ และ $[P_{21}]$ ของเมตริกซ์ $[P]$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สมการ (7.19) สามารถแยกเป็น 2 สมการดังนี้

$$[P_{11}]^{-1}[Q_{12}][P_{22}]^{-1}[Q_{21}]\{\phi\} - \left(\frac{1}{\beta}\right)^2 \{\phi\} = \{0\} \quad (7.20)$$

$$[P_{22}]^{-1}[Q_{21}][P_{11}]^{-1}[Q_{12}]\{\psi\} - \left(\frac{1}{\beta}\right)^2 \{\psi\} = \{0\} \quad (7.21)$$

คุณลักษณะการแพร่กระจายของท่อนำคลื่น เมื่อ $[\varepsilon_x] = [\mu_x] = [0]$ สามารถหาได้จากสมการ (7.20) หรือ (7.21) ซึ่งทั้งสองสมการนี้ใช้จำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าเพียงประมาณครึ่งหนึ่งของที่ใช้ในสมการ (7.26) กล่าวคือปัญหาค่าเจาะจงที่ได้จากการใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง \mathbf{E} , และ \mathbf{H} , จะลดรูปเป็นปัญหาค่าเจาะจงที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าคือ \mathbf{E} , หรือ \mathbf{H} , เท่านั้น

สำหรับกรณีที่ $[\varepsilon_x] \neq 0$ หรือ $[\mu_x] \neq 0$ คุณลักษณะการแพร่กระจายของท่อนำคลื่นสามารถหาได้จากเมตริกซ์ของปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐานดังนี้

$$[P]^{-1}[Q]\{\xi\} - \frac{1}{\beta}\{\xi\} = \{0\} \quad (7.22)$$

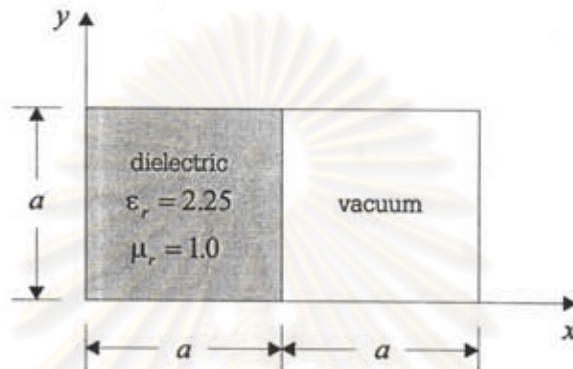
ตรวจสอบความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง

เช่นเดียวกับในบทที่ 2 ในส่วนนี้ผู้เสนอวิทยานิพนธ์จะทำการตรวจสอบความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางในปัญหาท่อนำคลื่น 4 ประเภทคือท่อนำคลื่นบรรจด้วยไดอิเล็กตริก ท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม ท่อนำคลื่นบรรจด้วยเฟอร์ไรต์ และท่อนำแสงแบบฝังในฉนวน

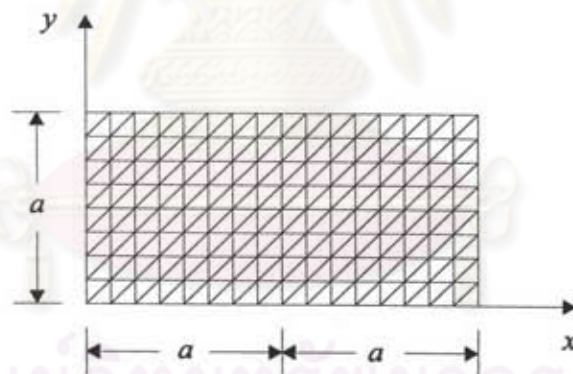
การตรวจสอบความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง ในตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้นมีรายละเอียดดังนี้

1. ท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก

พิจารณาท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกที่มีขนาดเป็น $2a \times a$ ล้อมรอบด้วยตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบและครึ่งหนึ่งของท่อนำคลื่นถูกบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกที่มีสภาพยอมสัมพัทธ์ ϵ_r และความซบซิมได้สัมพัทธ์ μ_r เท่ากับ 2.25 และ 1.0 ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 7.2



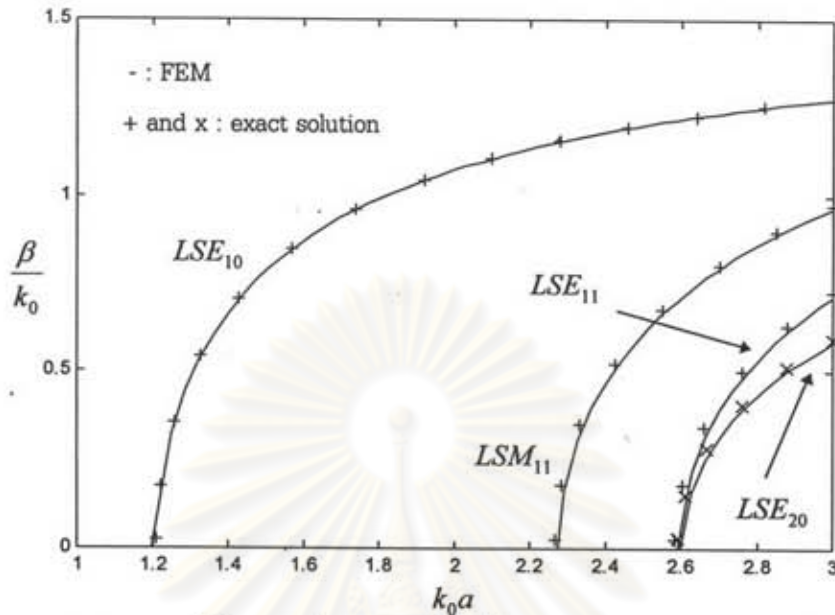
รูป 7.2 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก



รูป 7.3 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น

บรรจุด้วยไดอิเล็กตริกออกเป็น 256 อีลีเมนต์ 153 โหนด

แบ่งภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็นอีลีเมนต์สามเหลี่ยม โดยมีจำนวนอีลีเมนต์เท่ากับ 256 และมีจำนวนโหนดเท่ากับ 153 ดังแสดงในรูป 7.3 การแบ่งอีลีเมนต์ในลักษณะนี้ทำให้มีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า $\{\phi\}$ เท่ากับจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า $\{\psi\}$ เมื่อยังไม่ให้อื่นๆ ขอบเขตเท่ากับ 816 รูป 7.4 แสดงผลการคำนวณกราฟดิสเพอร์ชันที่ได้ โดยเส้นทึบเป็นผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เครื่องหมาย + และ x คือ ผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ (Balanis, 1989) ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 3.0$ ของโหมดมูลฐาน (LSE_{10}), LSM_{11} , LSE_{11} และ LSE_{20} ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ และวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 7.3 แสดงในตาราง 7.1



รูป 7.4 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางของท่อนำคลื่นบรรจด้วยไดอิเล็กตริก เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์

ตาราง 7.1 ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$ ของท่อนำคลื่นบรรจด้วยไดอิเล็กตริก ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง และขนาดความผิดพลาดเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ดังแสดงในรูป 7.3

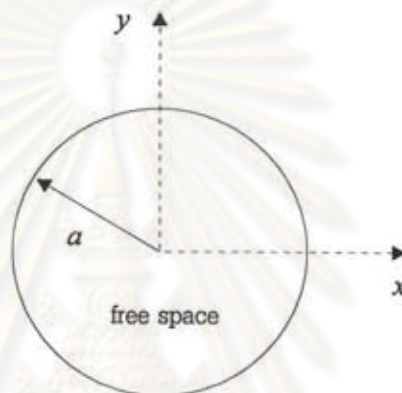
โมด	ผลเฉลยแม่นยำตรงของ β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$	β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$ จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	ขนาดความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$ จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
LSE_{10}	1.275756	1.274570	0.093%
LSM_{11}	0.971538	0.964999	0.673 %
LSE_{11}	0.728649	0.715678	1.780 %
LSE_{20}	0.593897	0.584527	1.578 %

จากรูป 7.4 พบว่าโมดมูลฐาน (LSE_{10}) ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สอดคล้องกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ ส่วนโมด LSE_{11} และ LSE_{20} เมื่อพิจารณาในช่วง $k_0a \approx 2.6$ ถึง $k_0a = 2.7$ พบว่ายังไม่สอดคล้องกับผลเฉลยแม่นยำตรงมากนัก อย่างไรก็ตามโมดทั้งสองนี้จะมีค่าสอดคล้องกับผลเฉลยแม่นยำตรงมากขึ้นเมื่อใช้จำนวนอีลิเมนต์ที่สูงขึ้น และจากผลการคำนวณที่ได้พบว่าไม่มีการปรากฏของผลเฉลยปลอมเทียมแต่อย่างใด

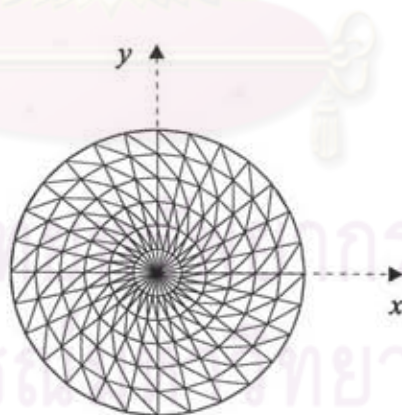
จากผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง ที่เสนอโดย Angkaew และคณะ (1987) สามารถวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไอโซทรอปิกไม่เอกพันธ์ได้

2. ท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม

พิจารณาท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ a ล้อมรอบด้วยตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ ภายในเป็นอวกาศว่าง ดังแสดงในรูป 7.5



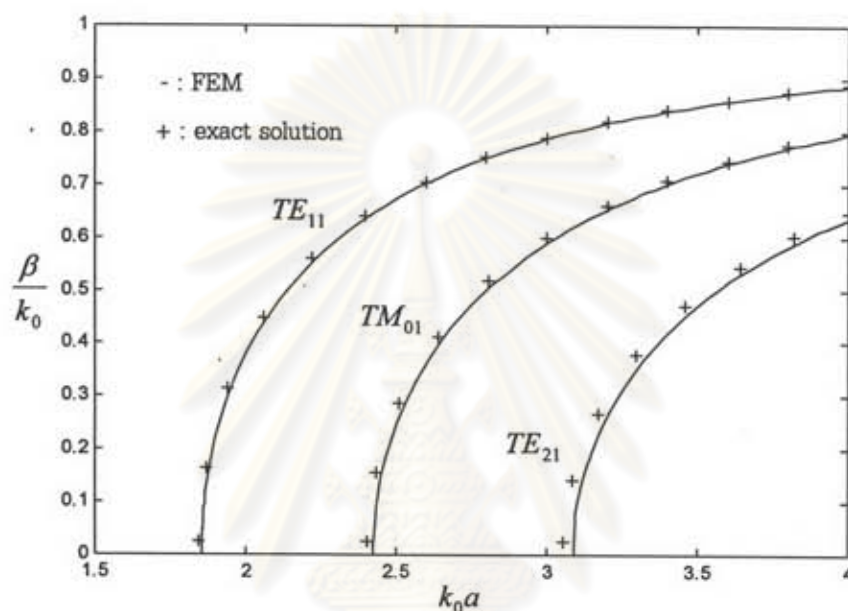
รูป 7.5 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น



รูป 7.6 การแบ่งอีลิเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น
ออกเป็น 308 อีลิเมนต์ 169 โหนด

แบ่งภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็นอีลิเมนต์สามเหลี่ยม โดยมีจำนวนอีลิเมนต์เท่ากับ 308 มีจำนวนโหนดเท่ากับ 169 ดังแสดงในรูป 7.6 การแบ่งอีลิเมนต์ในลักษณะนี้ทำให้มีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า $\{\phi\}$ เท่ากับจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า $\{\psi\}$ เมื่อยังไม่ใส่เงื่อนไขขอบเขตเท่ากับ 952

รูป 7.7 แสดงผลการคำนวณกราฟดิสเปอร์ชันที่ได้ โดยเส้นทึบเป็นผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ สัญลักษณ์ + คือผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ (Balanis, 1989) ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่า β/k_0 ที่ $k_0a = 4.0$ ของโหมดมูลฐาน (TE_{11}), TM_{01} และ TE_{21} ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 7.6 แสดงในตาราง 7.2



รูป 7.7 กราฟดิสเปอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางของท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์

ตาราง 7.2 ตัวอย่างของค่า β/k_0 ที่ $k_0a = 4.0$ ของท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง และขนาดความผิดพลาด เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 7.6

โหมด	ผลเฉลยแม่นยำตรงของ β/k_0 ที่ $k_0a = 4.0$	β/k_0 ที่ $k_0a = 4.0$ จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์	ขนาดความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a = 4.0$ จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์
TE_{11}	0.887766	0.886344	0.160 %
TM_{01}	0.799094	0.795350	0.468 %
TE_{21}	0.645738	0.635447	1.594 %

จากรูป 7.7 พบว่าโหมดมูลฐาน (TE_{11}) ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์สอดคล้องกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ โหมด TM_{01} เมื่อพิจารณาในช่วง $k_0 a \approx 2.42$ ถึง $k_0 a \approx 2.8$ ต่างจากผลเฉลยแม่นยำไม่มากนัก และเมื่อพิจารณาโหมด TE_{21} พบว่าผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ยังไม่สอดคล้องกับผลเฉลยแม่นยำตรงมากนัก อย่างไรก็ตามโหมดเหล่านี้จะมีค่าสอดคล้องกับผลเฉลยแม่นยำมากขึ้นเมื่อใช้จำนวนอีลีเมนต์ที่สูงขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง ที่เสนอโดย Angkaew และคณะ (1987) สามารถวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้งได้

3. ท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์

พิจารณาท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทางไมโครเวฟที่มีคุณสมบัติไร้ภาวะย้อนกลับ ที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูป 7.8 โดยเฟอร์ไรต์บรรจุอยู่ในท่อนำคลื่นในลักษณะที่ไม่สมมาตร และได้รับการไบแอสด้วยสนามแม่เหล็กสถิตในแนว y เทนเซอร์ความซึมได้ $[\mu]$ ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ และสภาพยอม ε ของเฟอร์ไรต์มีค่าดังนี้ (Collin, 1992)

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu & 0 & j\kappa \\ 0 & \mu_0 & 0 \\ -j\kappa & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (7.23)$$

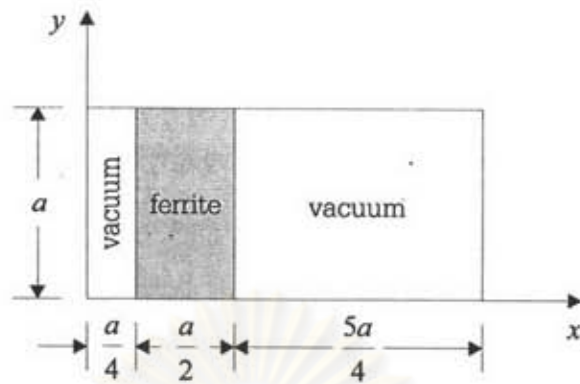
$$\varepsilon = 10\varepsilon_0 \quad (7.24)$$

เมื่อ ε_0 และ μ_0 คือสภาพยอมและความซึมได้ของอากาศว่าง ตามลำดับ โดยที่องค์ประกอบของเทนเซอร์ $[\mu]$ มีค่าเป็น

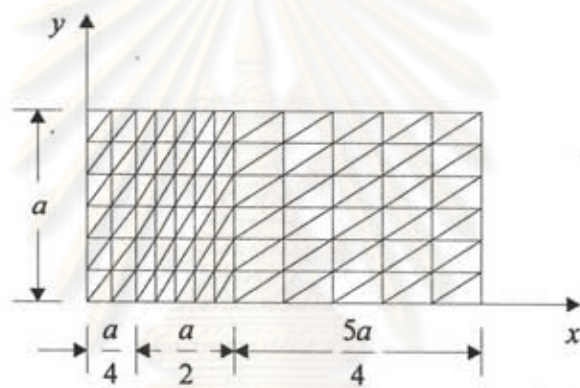
$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{\omega_m \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \quad (7.25)$$

$$\kappa = \mu_0 \frac{\omega_m \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (7.26)$$

$$\omega_0 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = \omega_m \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = 0.5 \quad (7.27)$$

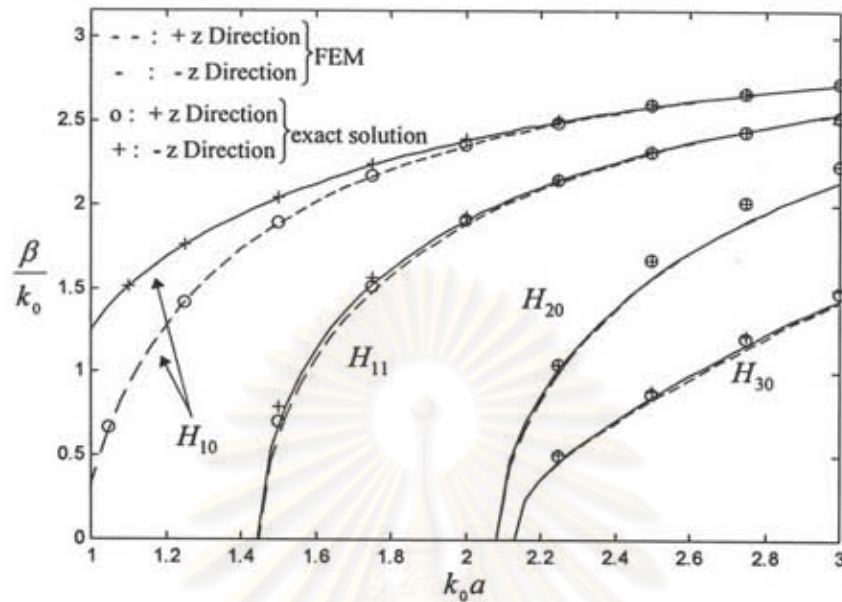


รูป 7.8 ภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์



รูป 7.9 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่น
บรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ออกเป็น 144 อีลีเมนต์ 91 โหนด

แบ่งภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็นอีลีเมนต์สามเหลี่ยม โดยมีจำนวนอีลีเมนต์เท่ากับ 144 และมีจำนวนโหนดเท่ากับ 91 ดังแสดงในรูป 7.9 การแบ่งอีลีเมนต์ในลักษณะนี้ทำให้มีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า $\{\phi\}$ เท่ากับจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า $\{\psi\}$ เมื่อยังไม่ให้งานขอบเขตเท่ากับ 468 รูป 7.10 แสดงผลการคำนวณกราฟดิสเพอร์ชันที่ได้ เส้นประและเส้นทึบแสดงผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ของการแพร่กระจายในทิศ $+z$ และ $-z$ ตามลำดับ สัญลักษณ์ 0 และ + คือผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ (Collin, 1991) ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่า β/k_0 ที่ $k_0 a = 3.0$ ของโหมดมูลฐาน (H_{10}) , H_{11} , H_{20} และ H_{30} ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์และวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 7.9 แสดงในตาราง 7.3



รูป 7.10 กราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางของท่อนำคลื่นเฟอร์ไรต์ เทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์

ตาราง 7.3 ตัวอย่างค่า β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ ที่คำนวณจากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง และขนาดความผิดพลาดเทียบกับผลเฉลยแม่นยำตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ เมื่อทำการแบ่งอีลิเมนต์ดังแสดงในรูป 7.9

ทิศการแพร่กระจาย	โหมด	ผลเฉลยแม่นยำตรงของ β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$	β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$ จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์	ขนาดความผิดพลาดของ β/k_0 ที่ $k_0a = 3.0$ จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์
+z	H_{10}	2.733965	2.722038	0.436 %
	H_{11}	2.524651	2.546604	0.870 %
	H_{20}	2.241712	2.138464	4.606 %
	H_{30}	1.481972	1.424453	3.881 %
-z	H_{10}	2.736537	2.720928	0.570 %
	H_{11}	2.527221	2.547568	0.805 %
	H_{20}	2.241712	2.137536	4.647 %
	H_{30}	1.496158	1.439359	3.796 %

จากรูป 7.10 พบว่าโหมดมูลฐาน (H_{10}) ของการแพร่กระจายในทิศ +z และ -z ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์สอดคล้องกับผลเฉลยแม่นยำตรงที่ได้จากวิธีเชิงวิเคราะห์ ส่วนโหมด H_{11} เมื่อพิจารณาในช่วง

$k_0 a \approx 1.5$ ถึง $k_0 a = 1.75$ และโหมด H_{30} พบว่าต่างจากผลเฉลยแม่นยำตรงไม่มากนัก และเมื่อพิจารณาโหมด H_{20} ในช่วง $k_0 a \approx 2.5$ ถึง $k_0 a = 3.0$ พบว่าผลการคำนวณที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ยังไม่สอดคล้องกับผลเฉลยแม่นยำตรงมากนัก อย่างไรก็ตามโหมดเหล่านี้จะมีค่าสอดคล้องกับผลเฉลยแม่นยำตรงมากขึ้น เมื่อใช้จำนวนอีลีเมนต์ที่สูงขึ้น

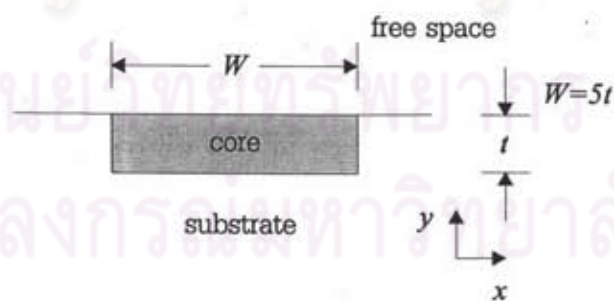
จากผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่เสนอโดย Angkaew และคณะ (1987) สามารถวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟ แอนไอโซทรอปิกแม่เหล็กที่เทนเซอร์ความซึมได้ $[\mu]$ อยู่ในรูปดังสมการ

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & 0 & \mu_{xz} \\ 0 & \mu_{yy} & 0 \\ \mu_{zx} & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix} \quad (7.28)$$

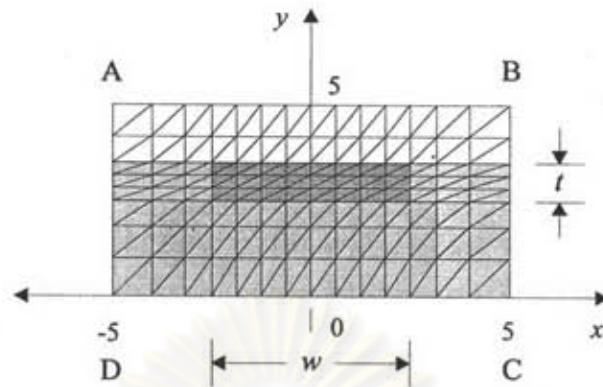
ได้

4. ท่อนำแสงแบบฝังในฉัสดรท

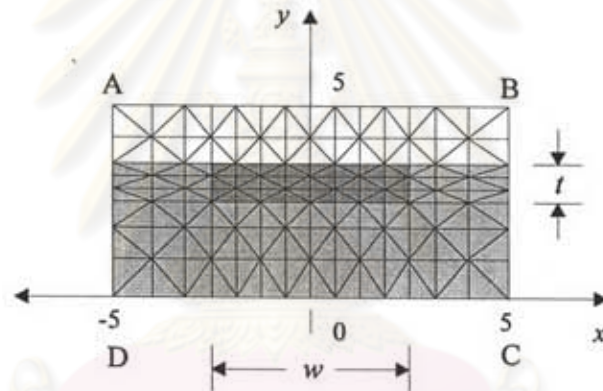
พิจารณาท่อนำแสงแบบฝังในฉัสดรท โครงสร้างของท่อนำคลื่นนี้ประกอบด้วยแกนซึ่งฝังอยู่ในฉัสดรท และด้านบนเป็นอวกาศว่าง ดังแสดงในรูป 7.11 การศึกษาในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือกรณีที่ท่อนำแสงเป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง และกรณีที่แกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง



รูป 7.11 ภาคตัดขวางของท่อนำแสงแบบฝังในฉัสดรท



รูป 7.12 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบที่ 1
ออกเป็น 224 อีลีเมนต์ 135 โหนด



รูป 7.13 การแบ่งอีลีเมนต์บนภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นแบบที่ 2
ออกเป็น 224 อีลีเมนต์ 135 โหนด

4.1 กรณีที่ท่อนำแสงเป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง

พิจารณาท่อนำแสงแบบฝังในชั้นสเตรทที่มีภาคตัดขวางดังแสดงในรูป 7.11 แกนและชั้นสเตรทของท่อนำคลื่นนี้เป็นแอนไอโซทรอปิกเนกาทีฟยูนิแอกเซียล (Kong, 1996) โดยที่แกนทางแสงขนานกับแกน x สภาพยอมสัมพัทธ์ $[\epsilon_r]$ และความซบซิมได้สัมพัทธ์ μ_r ของแกนมีค่าดังนี้

$$[\epsilon_r] = \begin{bmatrix} 2.222^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2.3129^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2.3129^2 \end{bmatrix} \quad (7.29)$$

$$\mu_r = 1.0 \quad (7.30)$$

สภาพยอมสัมพัทธ์ และความขบเซิมได้สัมพัทธ์ของขั้วสเตรทมีค่าดังนี้

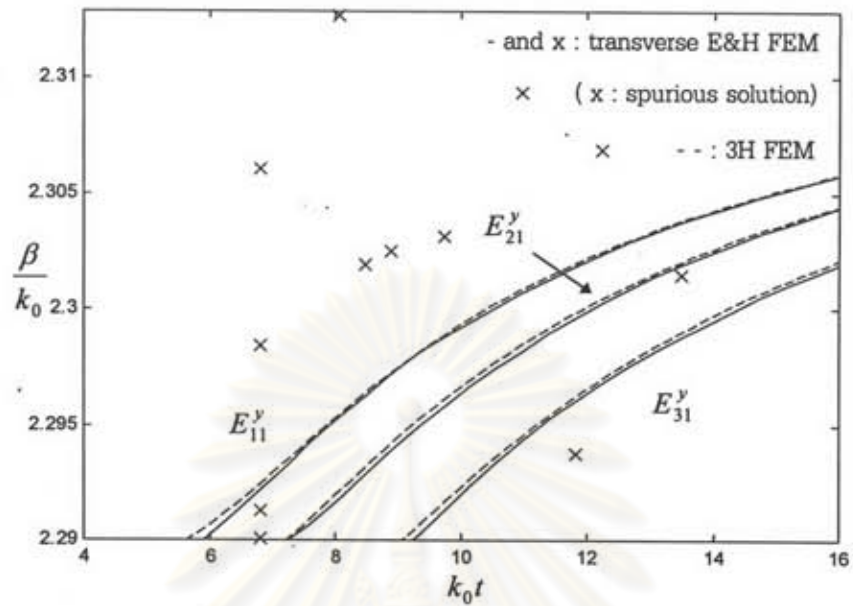
$$[\epsilon_r] = \begin{bmatrix} 2.20^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2.29^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2.29^2 \end{bmatrix} \quad (7.31)$$

$$\mu_r = 1.0 \quad (7.32)$$

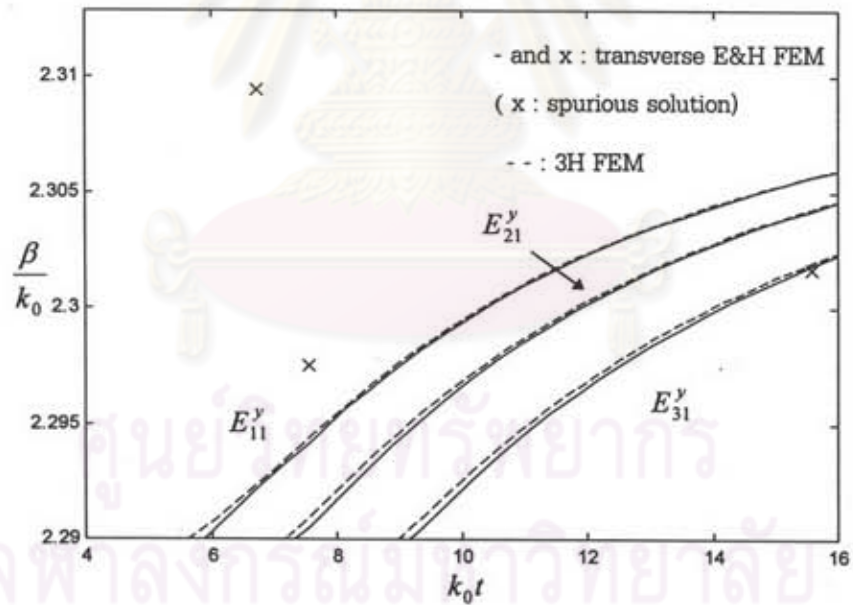
แบ่งภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็นอีลีเมนต์สามเหลี่ยม โดยมีจำนวนอีลีเมนต์เท่ากับ 224 จำนวนโนดเท่ากับ 135 ในแบบที่ 1 ดังแสดงในรูป 7.12 และในแบบที่ 2 ดังแสดงในรูป 7.13 โดยที่ขอบเขต AB, BC, CD และ DA คือขอบเขตเสมือนซึ่งสมมุติให้เป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ การแบ่งอีลีเมนต์ในสองลักษณะนี้จะทำให้มีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า $\{\phi\}$ เท่ากับจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า $\{\psi\}$ เมื่อยังไม่ให้เงื่อนไขขอบเขตเท่ากับ 716

รูป 7.14(ก) และ 7.14(ข) แสดงผลการคำนวณกราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เมื่อใช้การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 ดังแสดงในรูป 7.12 และแบบที่ 2 ดังแสดงในรูป 7.13 ตามลำดับ เส้นทึบและเครื่องหมาย \times เป็นผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง เส้นประเป็นผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อสัมประสิทธิ์พินอลติเท่ากับ $1/2.289$ ($p = 1/2.289$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



(ข)

รูป 7.14 กราฟดิสมเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง และที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อสัมพันธ์พื้นนอลดีเท่ากับ $1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในชั้นสเตรทที่มีแกนและชั้นสเตรทเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียล เมื่อใช้ (ก) การแบ่งอีลิเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลิเมนต์แบบที่ 2

จากรูป 7.14 โมด 3 อันดับแรกที่เลือกมาแสดงคือโมด E_{11}' , E_{21}' และ E_{31}' เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์เมื่อใช้การแบ่งอิลิเมนต์แบบที่ 2 ดังแสดงในรูป 7.14(ข) พบว่าโมดมูลฐาน (E_{11}') ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง ในช่วง $k_0 t \approx 7.0$ ถึง $k_0 t = 16.0$ สอดคล้องกับผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ ส่วนผลการวิเคราะห์ในโมด E_{21}' เมื่อพิจารณาที่ $k_0 t \approx 7.5$ ถึง $k_0 t \approx 9.0$ และโมด E_{31}' พบว่าต่างกันไม่มากนัก ส่วนผลการวิเคราะห์เมื่อใช้การแบ่งอิลิเมนต์แบบที่ 1 ดังแสดงในรูป 7.14(ก) พบว่าโมดมูลฐานที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง ในช่วง $k_0 t \approx 7.5$ ถึง $k_0 t = 16.0$ จะสอดคล้องกับผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ ส่วนผลการวิเคราะห์ในโมด E_{21}' เมื่อพิจารณาที่ $k_0 t \approx 8.0$ ถึง $k_0 t \approx 11.5$ และโมด E_{31}' พบว่าต่างกันไม่มากนัก

จากรูป 7.14 พบว่านอกจากผลเฉลยที่ถูกต้องแล้ว พบว่ายังมีผลเฉลยปลอมเทียมซึ่งแสดงด้วยสัญลักษณ์ \times เกิดขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามผลเฉลยปลอมเทียมที่เกิดขึ้นนี้สามารถแยกแยะกับโมดที่ถูกต้องได้โดยง่าย

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่เสนอโดย Angkaew และคณะ (1987) สามารถวิเคราะห์ท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยงได้

4.2 กรณีที่แกนของท่อนำแสงเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง

พิจารณาท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีภาคตัดขวางดังแสดงในรูป 7.11 แกนของท่อนำคลื่นนี้เป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง โดยที่แกนทางแสงอยู่ในระนาบ xy และทำมุม $-\pi/8$ เรเดียนกับแกน x เทนเซอร์สภาพยอมสัมพัทธ์ $[\epsilon_r]$ และความขบขี้มได้สัมพัทธ์ μ_r ของแกนคือ

$$[\epsilon_r] = \begin{bmatrix} \epsilon_{r,xx} & \epsilon_{r,xy} & 0 \\ \epsilon_{r,yx} & \epsilon_{r,yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{r,zz} \end{bmatrix} \quad (7.33)$$

$$\mu_r = 1.0 \quad (7.34)$$

เมื่อองค์ประกอบของเทนเซอร์สภาพยอมสัมพัทธ์มีค่าดังสมการต่อไปนี้ (Koshiba, 1992)

$$\epsilon_{r,xx} = n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta \quad (7.35a)$$

$$\epsilon_{r,yy} = n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta \quad (7.35b)$$

$$\epsilon_{r,zz} = n_o^2 \quad (7.35c)$$

$$\epsilon_{r,xy} = \epsilon_{r,yx} = (n_e^2 - n_o^2) \sin \theta \cos \theta \quad (7.35d)$$

$$n_0 = 2.3129 \quad (7.35e)$$

$$n_c = 2.222 \quad (7.35f)$$

n คือดัชนีหักเห, θ คือมุมระหว่างแกนทางแสงและแกน x ในที่นี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ $-\pi/8$ เรเดียน
 ชั้นสเตรทของท่อนำคลื่นนี้เป็นแอนไอโซทรอปิกเนกาทีฟยูนิแอกเซียลที่แกนทางแสงขนานกับแกน x โดยที่มี
 สภาพยอมสัมพันธ์ และความขบขี้มได้สัมพันธ์เป็น

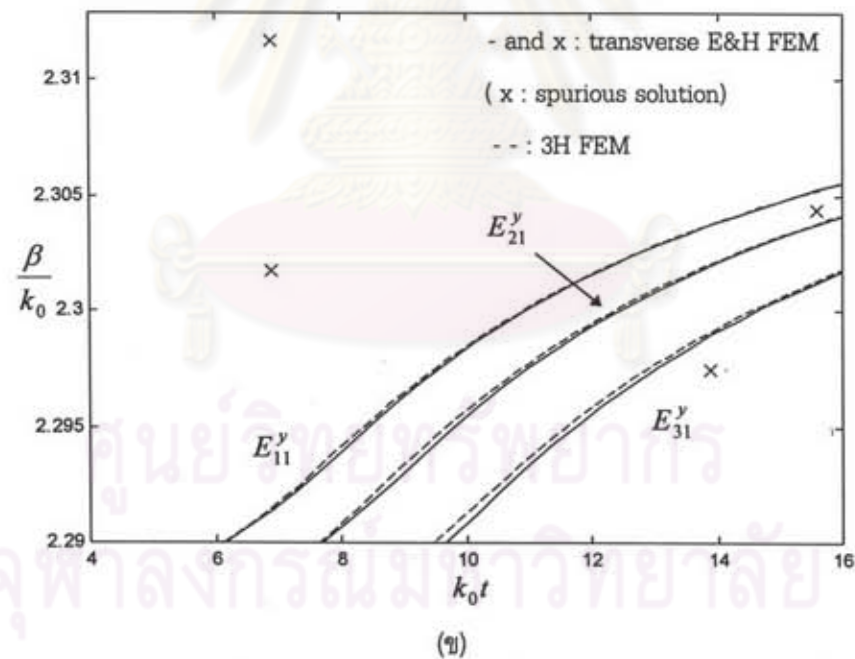
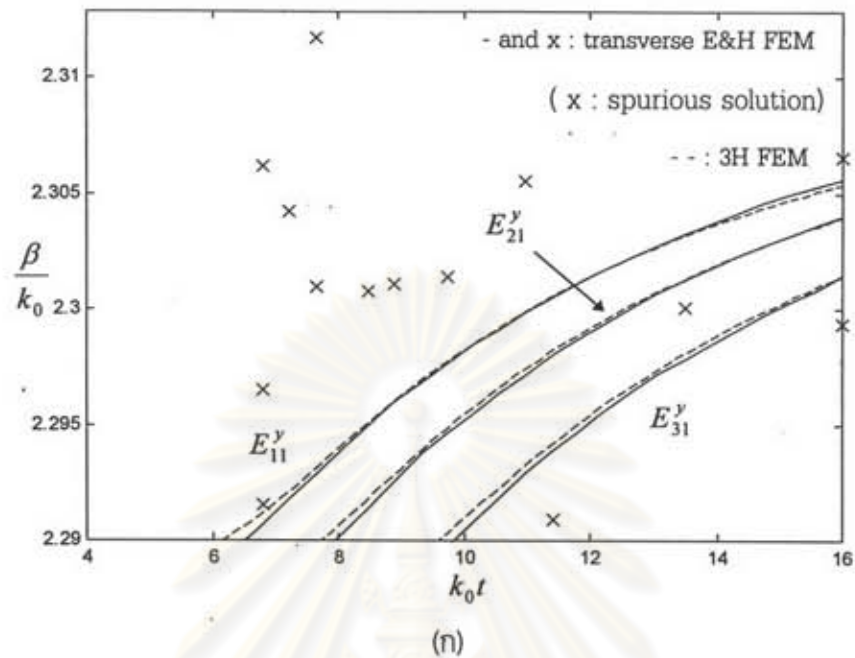
$$[\epsilon_r] = \begin{bmatrix} 2.20^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2.29^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2.29^2 \end{bmatrix} \quad (7.36)$$

$$\mu_r = 1.0 \quad (7.37)$$

แบ่งภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็นสามเหลี่ยม 224 อีลีเมนต์ ในแบบที่ 1 และในแบบที่ 2 ดัง
 แสดงในรูป 7.12 และ 7.13 โดยที่ขอบเขต AB, BC, CD และ DA คือขอบเขตเสมือนซึ่งสมมติให้เป็นตัวนำ
 ไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ การแบ่งอีลีเมนต์ในทั้งสองลักษณะนี้ทำให้มีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า $\{\phi\}$ เท่ากับจำนวน
 ตัวแปรไม่ทราบค่า $\{\psi\}$ เมื่อยังไม่ให้เงื่อนไขขอบเขตเท่ากับ 716

รูป 7.15(ก) และ 7.15(ข) แสดงผลการคำนวณกราฟดิสเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ เมื่อใช้
 การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 ดังแสดงในรูป 7.12 และแบบที่ 2 แสดงในรูป 7.13 ตามลำดับ เส้นทึบและเครื่องหมาย \times
 เป็นผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง เส้นประเป็นผลที่ได้
 จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อสัมพันธ์พินอลดีเท่ากับ $1/2.289$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 7.15 กราฟดิสมเพอร์ชันที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง และที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เมื่อสัมประสิทธิ์ที่นอลดีเท่ากับ $1/2.289$ ของท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่มีแกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง และฉนวนเป็นเนกาทีฟยูนิแอกเซียลเมื่อใช้ (ก) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 1 (ข) การแบ่งอีลีเมนต์แบบที่ 2

จากรูป 7.15 โมด 3 อันดับแรกที่เลือกมาแสดงคือโมด E_{11}' , E_{21}' และ E_{31}' เมื่อพิจารณา ผลการวิเคราะห์เมื่อใช้การแบ่งอิลีเมนต์แบบที่ 2 ดังแสดงในรูป 7.15(ข) พบว่าโมดมูลฐาน (E_{11}') ที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง สอดคล้องกับผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ ส่วนผลการวิเคราะห์ในโมด E_{21}' เมื่อพิจารณาที่ $k_0 t \approx 8.5$ ถึง $k_0 t \approx 10.5$ พบว่าต่างกันไม่มากนัก และผลการวิเคราะห์ในโมด E_{31}' เมื่อพิจารณาที่ $k_0 t \approx 10.0$ ถึง $k_0 t \approx 12.0$ พบว่าผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ทั้งสองวิธียังไม่สอดคล้องกันมากนัก ส่วนผลการวิเคราะห์เมื่อใช้การแบ่งอิลีเมนต์แบบที่ 1 ดังแสดงในรูป 7.15(ก) พบว่าโมดมูลฐานที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง ในช่วง $k_0 t \approx 7.5$ ถึง $k_0 t = 14.5$ สอดคล้องกับผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ ส่วนผลการวิเคราะห์ในโมด E_{21}' เมื่อพิจารณาที่ $k_0 t \approx 8.0$ ถึง $k_0 t \approx 11.0$ พบว่าต่างกันไม่มากนัก และเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการใช้การแบ่งอิลีเมนต์แบบที่ 2 ผลการวิเคราะห์ในโมด E_{31}' เมื่อพิจารณาที่ $k_0 t \approx 10.0$ ถึง $k_0 t \approx 12.0$ พบว่าผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ทั้งสองวิธียังไม่สอดคล้องกันมากนัก

เช่นเดียวกับการตีที่ท่อนำแสงเป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง จากรูป 7.15 พบว่านอกจากผลเฉลยที่ถูกต้องแล้ว พบว่ายังมีผลเฉลยปลอมเทียมซึ่งแสดงด้วยสัญลักษณ์ \times เกิดขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ผลเฉลยปลอมเทียมที่เกิดขึ้นนี้สามารถแยกแยะกับโมดที่ถูกต้องได้โดยง่าย

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่เสนอโดย Angkaew และคณะ (1987) สามารถวิเคราะห์ท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวางได้

สรุป

ผลจากการตรวจสอบความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นของวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง ที่เสนอโดย Angkaew และคณะ (1987) ในการวิเคราะห์ปัญหาท่อนำคลื่นที่ไม่มี การสูญเสีย สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในปัญหาท่อนำคลื่นแบบไอโซทรอปิกไม่เอกพันธ์ ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคือ ท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก พบว่าวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบไอโซทรอปิกไม่เอกพันธ์ได้
2. ในปัญหาท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคือ ท่อนำคลื่นกลางที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม พบว่าวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้งได้

3. ในปัญหาท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็กที่เทนเซอร์ความซึมซาบได้ $[\mu]$ อยู่ในรูปของ

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & 0 & \mu_{xz} \\ 0 & \mu_{yy} & 0 \\ \mu_{zx} & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix}$$

ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคือท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ที่มีการไบแอสสนามแม่เหล็กในแนวตามขวางของท่อนำคลื่น พบว่าวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็กที่เทนเซอร์ $[\mu]$ อยู่ในรูปดังกล่าวข้างต้นได้

4. ในปัญหาท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้าที่เทนเซอร์สภาพยอม $[\varepsilon]$ อยู่ในรูปของ

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \text{ และ } [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคือท่อนำแสงแบบฝังในฉนวนที่เป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง และกรณีที่เป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง พบว่าวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้าที่เทนเซอร์สภาพยอม $[\varepsilon]$ อยู่ในรูปดังกล่าวข้างต้นได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย