เอกสารอ้างอิง

Chiang K.S. Finite-element analysis of weakly guiding fibers with arbitrary refractive index distribution. IEEE J. Lightwave Technol. , LT-4 (1986) , pp 980-990.

Constantine , A. , Balanis. Advanced Engineering Electromagnetics. United Stated of America. : John wiley & sons, Inc. , 1989.

C.R.I Emson , DipEng , Method for the solution of open-boundary eletromagnetic-field problems. IEE PROCEEDINGS Vol. 135. , Part A. , No. 3. , March 1988.

Hayata K. , Eguchi M. and Koshiba M. Self-consistent finite/infinite element scheme for unbounded guided wave problems. IEEE transactions on Microwave Theory and Technics. Vol 36. , 1988 , (614-616).

Jianming Jin. The Finite Element Method in Electromagnetics. Singapore. : John Wiley & Sons, Inc. , 1993.

Jin-Fa Lee. Finite Element Analysis of Lossy Dielectric Waveguides. IEEE transactions on Microwave Theory and Technics. Vol. 42 , No. 6 , June 1994.

Jin-Fa Lee. Full-Wave Analysis of Dielectric Waveguides Using Tangential vector Finite Element. IEEE transactions on Microwave Theory and Technics. Vol. 39 , No. 8 , August 1991.

Koshiba M. , Hayata K. , and Suzuki M. Approximate scalar finite element analysis of anisotropic optical waveguides with off-diagonal elements in a permittivity tensor. IEEE transactions on Microwave Theory and Technics. Vol 32 , 1984 , pp 587-593.

Marc J. McDOYGALL and J.P. WEBB. Infinite Elements for the Analysis of Open Dielectric Waveguides. IEEE transactions on Microwave Theory and Technics. Vol. 37., No. 11. , November 1989.

Masanori Matsuhara , Fuminori Ohkubo. , Akihiro Maruta. Finite-Element Analysis of Open-Type Axially Symmetric Waveguides. Electronics and Communications in Japan. , Part2 , Vol. 75 , No. 12 , 1992.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

Masanori Matsuhara. , Hirotomo Yunoki. , Akihiro Maruta. Analysis of Open-Type Waveguides by the Vector Finite-Element Method. IEEE Microwave and guided wave letters. Vol. 1 , No. 12 , December 1991.

Masanori Matsuhara. , Masato Ishizaki. Finite element Method for Open-Type Waveguides. Electronic and Communications in Japan. Part I , C-I vol. J73-C-I No.11, pp 741-743. , 1990.

Masanori Koshiba. Optical Waveguide Analysis. United Stated of America.:McGraw-Hill. , 1992.

Wood , W.L. On the finite element solution of an exterior boundary value problem. Int.J. Numer. Methods Eng. , 1976, 10 , pp 885-891.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

การเข้าสมการระบบโดยวิธีเรย์ลี-ริตซ์

วิธีไฟไนต์อีลีเมนท์ที่ใช้การจัดรูปสมการโดยวิธีเรย์ลี-ริตซ์ ซึ่งวิธีเรย์ลี-ริตซ์ เป็นวิธีการหนึ่งของวิธีนิพจน์แปรผัน (variational method) (Jin, 1993) ฟังก์ชันนอลที่เป็นนิพจน์แปรผันของสมการ (2.09ข) ถูกกำหนดให้มีค่าดังนี้ (Jin, 1993)

$$F(\mathbf{E}) = \langle L\mathbf{E}, \mathbf{E} \rangle$$

เมื่อผลคูณภายใน (inner product) เป็น

$$\langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle = \iint_{\Omega} \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}^* d\Omega$$

โดยที่ * คือสังยุคเชิงซ้อน , L คือตัวดำเนินการผูกผันตัวเอง

จากสมการ (2.12) ตัวดำเนินการ L ของสมการคือ

$$\left[\nabla_t \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla_t \times \right) - k_0^2 \varepsilon_r \right] \tag{ก.1}$$

ฟังก์ชันนอลของสมการ (2.12) จะได้ว่า

$$F(\mathbf{E}) = \iint \mathbf{f}_t^* \cdot \left[\nabla_t \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla_t \times \mathbf{f}_t \right) + \beta^2 \frac{1}{\mu_r} \left(\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t \right) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{f}_t \right] d\Omega \tag{ก.2}$$

จากทฤษฎีบทไดเวอร์เจนซ์และเอกลักษณ์เวกเตอร์

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) \tag{ก.3}$$

สมการ (ก.2) สามารถเขียนได้เป็น

$$F(\mathbf{E}) = \iint \mathbf{f}_t^* \cdot \left[\nabla_t \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla_t \times \mathbf{f}_t \right) + \beta^2 \frac{1}{\mu_r} \left(\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t \right) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{f}_t \right] d\Omega$$

$$= \iint \left[\frac{1}{\mu_r} \left(\nabla_t \times \mathbf{f}_t^* \right) \cdot \left(\nabla_t \times \mathbf{f}_t \right) + \beta^2 \frac{1}{\mu_r} \mathbf{f}_t^* \cdot \left(\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t \right) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{f}_t^* \cdot \mathbf{f}_t \right] d\Omega$$

$$- \oint_{\Gamma} \left[\mathbf{f}_t^* \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla_t \times \mathbf{f}_t \right) \right] \cdot \mathbf{n} dl \tag{ก.4}$$

จากเอกลักษณ์เวกเตอร์

$$(\mathbf{A}\times\mathbf{B})\cdot\mathbf{C}=(\mathbf{B}\times\mathbf{C})\cdot\mathbf{A}=(\mathbf{C}\times\mathbf{A})\cdot\mathbf{B} \qquad (ก.5)$$

พจน์ $\left[\mathbf{f}_t^*\times\left(\frac{1}{\mu_r}\nabla_t\times\mathbf{f}_t\right)\right]\cdot\mathbf{n}$ ในเทอมของการอินทิกรัลวงรอบปิดในสมการที่ (ก.4) สามารถเขียนได้เป็น

$$\left[\mathbf{f}_t^*\times\left(\frac{1}{\mu_r}\nabla_t\times\mathbf{f}_t\right)\right]\cdot\mathbf{n}=\left(\mathbf{n}\times\mathbf{f}_t^*\right)\cdot\left(\frac{1}{\mu_r}\nabla_t\times\mathbf{f}_t\right) \qquad (ก.6)$$

จากเงื่อนไขขอบเขตตามสมการที่ (2.22) จะได้ว่า

$$\left[\mathbf{f}_t^*\times\left(\frac{1}{\mu_r}\nabla_t\times\mathbf{f}_t\right)\right]\cdot\mathbf{n}=\mathbf{i}_z\cdot\left(\frac{1}{\mu_r}\nabla_t\times\mathbf{f}_t\right) \qquad (ก.7)$$

$\mathbf{f}_t$ ในสมการที่ (ก.4) จะสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กดังแสดงในชุดสมการที่ (2.22) จากที่กล่าวมาทำให้อินทิกรัลวงรอบปิด (contour integral) ในสมการ (ก.4) มีค่าเท่ากับเงื่อนไขขอบเขตดังสมการ (2.22) เพราะฉะนั้นสมการ (ก.4) จึงลดรูปเป็น

$$F(\mathbf{E})=\iint\left[\frac{1}{\mu_r}\left(\nabla_t\times\mathbf{f}_t^*\right)\cdot\left(\nabla_t\times\mathbf{f}_t\right)+\beta^2\frac{1}{\mu_r}\mathbf{f}_t^*\cdot\left(\nabla_t g_z+\mathbf{f}_t\right)-k_0^2\varepsilon_r\mathbf{f}_t^*\cdot\mathbf{f}_t\right]d\Omega$$

(ก.8)

พิจารณาสมการที่ (2.13) ที่มีความสอดคล้องกับสมการที่ (2.15) รูปฟังก์ชันนอลจะได้ว่า

$$F(\mathbf{E})=\iint\left[g_z^*\cdot\beta^2\nabla_t\times\left(\frac{1}{\mu_r}\left(\nabla_t g_z+\mathbf{f}_t\right)\times\mathbf{i}_z\right)-\beta^2k_0^2\varepsilon_r g_z^* g_z\right]d\Omega \qquad (ก.9)$$

โดยใช้ความสัมพันธ์ของเอกลักษณ์เวกเตอร์ในสมการ (ก.3) และทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์พจน์

$$F(\mathbf{E})=\iint\left[g_z^*\cdot\beta^2\nabla_t\times\left(\frac{1}{\mu_r}\left(\nabla_t g_z+\mathbf{f}_t\right)\times\mathbf{i}_z\right)\right]d\Omega$$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\iint\left[g_z^*\cdot\beta^2\nabla_t\times\left(\frac{1}{\mu_r}\left(\nabla_t g_z+\mathbf{f}_t\right)\times\mathbf{i}_z\right)\right]d\Omega=\beta^2\iint\left[\left(\nabla_t\times g_z^*\right)\cdot\left(\frac{1}{\mu_r}\left(\nabla_t g_z+\mathbf{f}_t\right)\right)\times\mathbf{i}_z\right]d\Omega$$
$$-\oint_\Gamma\left[g_z^*\times\left(\frac{1}{\mu_r}\left(\nabla_t g_z+\mathbf{f}_t\right)\times\mathbf{i}_z\right)\right]\cdot\mathbf{n}dl$$

(ก.10)

โดยอาศัยคุณสมบัติของเวกเตอร์ $\mathbf{A}\times(\mathbf{B}\times\mathbf{C})=(\mathbf{A}\cdot\mathbf{C})\mathbf{B}-(\mathbf{A}\cdot\mathbf{B})\mathbf{C}$ และคุณสมบัติเงื่อนไขขอบเขตตามสมการที่ (2.22) จะได้ว่า

$$\iint\left[g_z^* \cdot \beta^2 \nabla_t \times \left(\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) \times \mathbf{i}_z\right)\right] d\Omega = \beta^2 \iint\left[\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t g_z^*) \cdot (\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t)\right] d\Omega$$
$$-\oint_\Gamma\left[g_z^* \times \left(\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) \times \mathbf{i}_z\right)\right] \cdot \mathbf{n} dl$$

(ก.11)

จากเอกลักษณ์เวกเตอร์ในสมการที่ (ก.5) พจน์ $\left[g_z^* \times \left(\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) \times \mathbf{i}_z\right)\right] \cdot \mathbf{n}$ ในพจน์ของอินทิกรัลวงรอบปิดในสมการ (ก.11) สามารถเขียนได้เป็น

$$\left[g_z^* \times \left(\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) \times \mathbf{i}_z\right)\right] \cdot \mathbf{n} = g_z^* \frac{1}{\mu_r}(\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) \cdot \mathbf{n} \quad \text{(ก.12)}$$

$\mathbf{f}_t$ และ g_z ในสมการที่ (ก.12) จะสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็ก ดังชุดสมการที่ (2.22) และ g_z^* จะสอดคล้องกับคุณสมบัติของเงื่อนไขขอบเขตในสมการที่ (2.19) ทำให้อินทิกรัลวงรอบปิดในสมการที่ (ก.11) มีค่าเท่ากับเงื่อนไขขอบเขตดังสมการที่ (2.22) เพราะฉะนั้นสมการที่ (ก.11) จึงลดรูปเป็น

$$F(\mathbf{E}) = \beta^2 \iint\left[\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t g_z^*) \cdot (\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) - k_0^2 \varepsilon_r g_z^* g_z\right] d\Omega \quad \text{(ก.13)}$$

รูปนิพจน์แปรผันของสมการ (2.12) และ (2.13) ได้จากผลรวมของสมการ (ก.8) และ (ก.13) ซึ่งก็คือ

$$F(\mathbf{E}) = \beta^2 \iint\left[\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t g_z^* + \mathbf{f}_t^*) \cdot (\nabla_t e_z + \mathbf{f}_t) - k_0^2 \varepsilon_r g_z^* g_z\right] d\Omega + \iint\left[\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t \times \mathbf{f}_t^*) \cdot (\nabla_t \times \mathbf{f}_t)\right] d\Omega$$

$$-k_0^2 \iint[\varepsilon_r \mathbf{f}_t^* \cdot \mathbf{f}_t] d\Omega \quad \text{(ก.14)}$$

ทำการจัดเทอมใหม่และพิจารณาที่จุด ภาวะคงที่ (stationary condition)

$$\beta^2 = \frac{k_0^2 \iint(\varepsilon_r \mathbf{f}_t \cdot \mathbf{f}_t) d\Omega - \iint\left[\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t \times \mathbf{f}_t) \cdot (\nabla_t \times \mathbf{f}_t)\right] d\Omega}{\iint\left[\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) \cdot (\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) - k_0^2 \varepsilon_r g_z g_z\right] d\Omega} \quad \text{(ก.15)}$$

$$\beta^2(\mathbf{f}_t, g_z) = \frac{a(\mathbf{f}_t)}{b(\mathbf{f}_t, g_z)} \quad \text{(ก.16)}$$

$$a(\mathbf{f}_t) = k_0^2 \iint(\varepsilon_r \mathbf{f}_t \cdot \mathbf{f}_t) d\Omega - \iint\left[\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t \times \mathbf{f}_t) \cdot (\nabla_t \times \mathbf{f}_t)\right] d\Omega \quad \text{(ก.17)}$$

$$b(\mathbf{f}_t, g_z) = \iint\left[\frac{1}{\mu_r}(\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) \cdot (\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) - k_0^2 \varepsilon_r g_z g_z\right] d\Omega \quad \text{(ก.18)}$$

ชุดสมการที่ (ก.15)-(ก.18) ทำการจัดสมการระบบใหม่จะได้ว่า

$$\beta^2(\mathbf{f}_t, g_z) = \frac{a(\mathbf{f}_t)}{b(\mathbf{f}_t, g_z)} \tag{ก.19}$$

$$a(\mathbf{f}_t) = k_0^2 \varepsilon_r \iint |\mathbf{f}_t|^2 d\Omega - \iint \left[\frac{1}{\mu_r} \left| (\nabla_t \times \mathbf{f}_t) \right|^2 \right] d\Omega \tag{ก.20}$$

$$b(\mathbf{f}_t, g_z) = \iint \left[\frac{1}{\mu_r} \left| (\nabla_t g_z + \mathbf{f}_t) \right|^2 - k_0^2 \varepsilon_r |g_z|^2 \right] d\Omega \tag{ก.21}$$

ภาคผนวก ข.

ขั้นตอนการจัดรูปแบบของเทอม a และ $n(r)$ ให้อยู่ในรูปของเทอม n_c

1. รายละเอียดในการ input ค่า n_1/n_2 หรือ n_c/n_2

จากชุดสมการที่ 16 (Masanori Matsuhara et al. 1992)

$$n_c = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\int_0^{r_0}\{n^2(r) - n_2^2\}rdr \qquad \text{(ข1)}$$

โดยที่

$$n^2(r) = n_1^2\left\{1 - a\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\} \qquad \text{(ข2)}$$

$$a = \frac{\left(n_1^2 - n_2^2\right)}{n_1^2} \qquad \text{(ข3)}$$

n_c = ค่าดัชนีหักเหของแกนประสิทธิผล (effective index of refraction of the core)

$n(r)$ = ค่าดัชนีหักเหของแกน (refractive index of core)

r_0 = ค่ารัศมีของแกน (radias of the core)

n_1 = ค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 (refractive index of core)

n_2 = ค่าดัชนีหักเหของวัสดุหุ้ม (refractive of cladding)

a = ค่าความแตกต่างของค่าดัชนีหักเห (refractive index difference)

ซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้ 2 กรณี

1. กรณี core เป็น step index กรณีนี้เรา input ในรูปของ n_1/n_2 ซึ่งในที่นี้ก็หมายความว่าค่า $n_c = n_1$ ซึ่งสามรถตรวจสอบได้ดังจะแสดงในช่วงต่อไป

2. กรณี core เป็น grad index กรณีนี้ input ในรูปของ n_c/n_2 ซึ่งในที่นี้ความยุ่งยากของค่า $n(r)$ ในการแทนค่า k_0 ก็จะหมดไป ซึ่งเราจะคิดค่า k_0 ให้อยู่ในเทอมของ n_c และในการหาค่าของสัมประสิทธ์ตัวคูณ a และค่าของดัชนีหักเหสำหรับ grad-index $n(r)$ จะจัดให้อยู่ในรูปใหม่ได้ดังแสดงในช่วงต่อไป

n_c(effective index of refraction of core) นี้ในความหมายทางกายภาพนั้นจะเป็นตัวที่แสดงถึงค่าของดัชนีหักเหที่เป็นค่าบ่งชี้ในการส่งผ่านไปใน core ซึ่งค่า n_c นี้จะมีผลต่อมุมที่สะท้อนกลับไปมาใน core ซึ่งเป็นตามสูตรดังนี้

$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ โดยที่ θ_c = critical angle at interfaces (ข4)

ซึ่งใน guide mode นั้นค่า $n_c \geq n_2$ ในรูปแบบของการแก้ปัญหาแบบ grad-index นั้นถ้าต้องการหลีกเลี่ยงการแก้ปัญหาที่ยุ่งยากในรูปของ $n(r)$ ก็พยายามจัดเทอมของค่า k_0 ให้เข้าในรูปแบบของ n_c ซึ่งในการป้อนค่านั้นและการหาค่า B และ V จะลดความยุ่งยากลงไปได้มาก

2. การแสดงการจัดรูปแบบเทอม a และเทอม $n(r)$ ให้อยู่ในรูป n_c

2.1 กรณี step index จากสมการที่ (ข1) จะได้ว่า

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\int_0^{r_0}\left\{n^2(r) - n_2^2\right\}rdr$$

กรณีของ step index นั้นค่าของดัชนีหักเหภายใน core นั้นมีค่าเป็นค่าคงที่คือ n_1 สมการจะได้ว่า

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\int_0^{r_0}\left\{n_1^2 - n_2^2\right\}rdr \tag{ข5.1}$$

จะเห็นได้ว่าเทอม $\left(n_1^2 - n_2^2\right)$ นั้นมีค่าคงที่สามารถดึงออกจากรูปของการอินทิเกรตได้

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\left(n_1^2 - n_2^2\right)\int_0^{r_0} rdr$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\left(n_1^2 - n_2^2\right)\frac{r_0^2}{2}$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \left(n_1^2 - n_2^2\right)$$

$$n_c^2 = n_1^2 \tag{ข5.2}$$

2.2 กรณีของ grad-index จากสมการที่ (ข1) ,(ข2) , (ข3) จะได้ว่า

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\int_0^{r_0}\left\{n^2(r) - n_2^2\right\}rdr$$

$$n^2(r) = n_1^2\left\{1 - a\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\}$$

$$a = \frac{\left(n_1^2 - n_2^2\right)}{n_1^2}$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\int_0^{r_0}\left[\left\{n_1^2\left(1 - a\left[\frac{r}{r_0}\right]^2\right)\right\} - n_2^2\right]rdr \tag{ข6.1}$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\int_0^{r_0}\left[\left\{n_1^2 - \frac{n_1^2\left(n_1^2 - n_2^2\right)}{n_1^2}\left[\frac{r}{r_0}\right]^2\right\} - n_2^2\right]rdr$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\int_0^{r_0}\left[\left\{n_1^2 - \left(n_1^2 - n_2^2\right)\left[\frac{r}{r_0}\right]^2\right\} - n_2^2\right]rdr$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\int_0^{r_0}\left[n_1^2 - n_2^2 - \left(n_1^2 - n_2^2\right)\left[\frac{r}{r_0}\right]^2\right]rdr$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\int_0^{r_0}\left[\left(n_1^2 - n_2^2\right) - \left(n_1^2 - n_2^2\right)\left[\frac{r}{r_0}\right]^2\right]rdr$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\left(n_1^2 - n_2^2\right)\int_0^{r_0}\left[1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right]rdr$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\left(n_1^2 - n_2^2\right)\left[\int_0^{r_0} rdr - \int_0^{r_0}\frac{r^3}{r_0^2}dr\right]$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\left(n_1^2 - n_2^2\right)\left[\int_0^{r_0} rdr - \frac{1}{r_0^2}\int_0^{r_0} r^3 dr\right]$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \frac{2}{r_0^2}\left(n_1^2 - n_2^2\right)\left[\frac{r_0^2}{2} - \left(\frac{1}{r_0^2}\cdot\frac{r_0^4}{4}\right)\right]$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \left[\left(\frac{2}{r_0^2}\left(n_1^2 - n_2^2\right)\cdot\frac{r_0^2}{2}\right) - \left(\frac{2}{r_0^2}\left(n_1^2 - n_2^2\right)\cdot\frac{r_0^2}{4}\right)\right]$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \left[\left(n_1^2 - n_2^2\right) - \frac{\left(n_1^2 - n_2^2\right)}{2}\right]$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \left[\frac{2\left(n_1^2 - n_2^2\right) - \left(n_1^2 - n_2^2\right)}{2}\right]$$

$$n_c^2 = n_2^2 + \left[\frac{\left(n_1^2 - n_2^2\right)}{2}\right] \qquad \text{(ข6.2)}$$

$$n_c^2 = \frac{2n_2^2 + n_1^2 - n_2^2}{2} \qquad \text{(ข6.3)}$$

$$n_c^2 = \frac{n_1^2 + n_2^2}{2} \quad \text{หรือ} \quad n_c = \sqrt{\frac{\left(n_1^2 + n_2^2\right)}{2}} \qquad \text{(ข6.4)}$$

$$2n_c^2 = n_1^2 + n_2^2 \qquad \text{(ข6.5)}$$

$$\frac{2n_c^2}{2n_2^2} = \frac{n_1^2}{2n_2^2} + \frac{n_2^2}{2n_2^2} \qquad \text{(ข6.6)}$$

$$\frac{n_c^2}{n_2^2} = \frac{n_1^2}{2n_2^2} + \frac{1}{2} \qquad \text{(ข6.7)}$$

$$\frac{n_c^2}{n_2^2} = \frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_2^2} \qquad \text{(ข6.8)}$$

การจัดรูปแบบของสัมประสิทธิ์ตัวคูณ a จะได้รูปแบบดังนี้

$$a = \frac{\left(n_1^2 - n_2^2\right)}{n_1^2}$$

ถ้า input ในรูปของเทอม $\dfrac{n_c}{n_2} = K \Rightarrow n_c = Kn_2$ โดยที่ค่า K เป็นอัตราส่วนที่จะต้อง input เข้าไปในระบบ จากสมการ (ข6.4)

$$n_c = \sqrt{\frac{\left(n_1^2 + n_2^2\right)}{2}} = Kn_2 \qquad (ข7.1)$$

$$\frac{\left(n_1^2 + n_2^2\right)}{2} = K^2 n_2^2$$

$$n_1^2 = 2K^2 n_2^2 - n_2^2$$

$$n_1^2 = n_2^2\left(2K^2 - 1\right) \Leftrightarrow n_2^2 = \frac{n_1^2}{\left(2K^2 - 1\right)}$$

จัดสมการของเทอม a ได้ดังนี้

$$a = \frac{\left(n_1^2 - n_2^2\right)}{n_1^2}$$

$$a = \frac{\left(n_2^2\left[2K^2 - 1\right] - n_2^2\right)}{n_2^2\left[2K^2 - 1\right]}$$

$$a = \frac{\left(2K^2 n_2^2 - n_2^2 - n_2^2\right)}{n_2^2\left[2K^2 - 1\right]}$$

$$a = \frac{n_2^2\left[2K^2 - 2\right]}{n_2^2\left[2K^2 - 1\right]}$$

$$a = \frac{\left[2K^2 - 2\right]}{\left[2K^2 - 1\right]} \qquad (ข7.2)$$

การจัดรูปแบบของเทอม n(r) grad-index ในองค์ประกอบของตัวประกอบ n_c

$$n^2(r) = n_1^2\left\{1 - a\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\}$$

$$n^2(r) = n_2^2\left[2K^2 - 1\right]\left\{1 - \frac{\left[2K^2 - 2\right]}{\left[2K^2 - 1\right]}\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\} \qquad (ข7.3)$$

$$n^2(r) = \left\{n_2^2\left[2K^2 - 1\right] - \frac{n_2^2\left[2K^2 - 1\right]\left[2K^2 - 2\right]}{\left[2K^2 - 1\right]}\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\}$$

$$n^2(r) = \left\{n_2^2\left[2K^2 - 1\right] - n_2^2\left[2K^2 - 2\right]\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\}$$

$$n^2(r) = n_2^2\left\{\left[2K^2 - 1\right] - \left[2K^2 - 2\right]\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\}$$

$$\frac{n^2(r)}{n_2^2} = \left\{\left[2K^2 - 1\right] - \left[2K^2 - 2\right]\left(\frac{r}{r_0}\right)^2\right\} \qquad (ข7.4)$$

ประวัติผู้เขียน

นาย กฤษณ์ มันตาวิจักษณ์ เกิดวันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2513 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยรังสิต ในปีการศึกษา 2536 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2536