

論 文

振動하는 誘電體面에서 電磁波의 反射와 透過
(TM파에 대하여)

正會員 具 然 健* 正會員 李 正 秀**

Reflection and Transmission of Electromagnetic
Waves at the Oscillating Dielectric
Plane Surface
(Transverse Magnetic Wave)

Yeon Geon KOO*, Jung Soo LEE** *Regular Members*

要 約 정현적으로 진동하는 유전체 경계면에서 전자파(TM파)의 반사, 투과현상을 진동하는 임의의 순간에 등속운동이라 가정하여 Lorentz 변환을 확대적용하여 이론적으로 해석하였다. 전자파의 입사각, 운동매질의 유전율, 진동속도의 함수로써 반사, 투과특성을 수치계산 검토하였다.

ABSTRACT In the reflection and transmission of a transverse magnetic wave(TM wave) from a dielectric plane oscillating sinusoidally perpendicular to its surface, one could assume that the boundary moves with a uniform velocity equal to the instantaneous oscillating velocity. According to the extended Lorentz transform, the reflected and the transmitted fields are obtained as the function of the dielectric permittivity, the oscillating velocities, and the incident angles. The above results are analyzed graphically.

1. 서 론

전자파가 두 매질의 경계면에 입사하면 반사, 투과하게 되며 이에 의한 전자계는 파장, 입사각 및 전기적인 특성 (유전율, 투자율, 도전율)의 영향뿐만 아니라 경계면의 상태 (평면, 불규칙면,

불규칙인 운동)의 영향을 받는다. 이와같은 현상은 자연과학, 공학 등에서 많이 응용되고 있으며 많은 연구가 이뤄져 있다⁽¹⁾⁽²⁾. 그러나 이러한 연구는 입사파가 횡파(TE)에서 행하여 졌으며 Transverse Magnetic(TM)파에 대하여서는 소홀히 하였거나 등속운동인 경우만 고려하였다^{(3)~(5)}.

본 논문에서는 유전체가 경계면에 수직인 방향으로 정현적으로 운동할 때 경계면에 임의의 각으로 입사하는 전자파(TM)의 반사와 투과를 경계면의 유전율, 진동속도의 함수로 고찰하였

*, ** 弘益大學校電子工學科
Dept. of Electronic Engineering
Hongik University, Seoul, 121 Korea.
論文番號 : 86-39 (接受 1986. 7. 22)

다. 경계면의 진동속도 \bar{v} 는 어느 순간에 일정하다고 보고 순간적인 등속도 (instantaneous uniform velocity)를 가정하였다. 등속운동계에서 적용할 수 있는 Maxwell-Minkowski 전자파방정식에 의하여 임의의 순간에 전자계를 구하고 전체의 진동주기에 확대 적용하였다⁽⁵⁾⁽⁶⁾. 평균적인 반사, 투과특성도 검토하였다.

2. 이 론

2-1. 개 요

무한한 유전체평면이 $x-y$ 좌표면에 평행하게 놓여있으며, 경계면이 임의의 시간 t 에서 z 축상의 점 $(0, 0, r(t))$ 을 통과하고 정현적으로 진동하는 경우를 생각한다. 이 경우 변위 $r(t)$ 는

$$r(t) = d \sin \Omega t \quad (1)$$

로 표시할 수 있다. d 는 최대변위 즉, 진동진폭이고 Ω 는 진동각속도이다. 이 경우 임의의 시간 t 에서 진동경계면의 순간적인 속도 $\bar{v}(t)$ 는

$$\bar{v}(t) = \hat{z} \Omega d \cos \Omega t = \hat{z} c \beta(t) \quad (2)$$

가 된다. 여기서 $\beta(t) = v(t)/c$, c 는 진공중에서 빛의 속도이고 최대진동속도는 $\beta_{max} = \frac{\Omega d}{c}$ 이다. $\Omega \ll \omega$ 이면 $0 \leq \Omega t < 2\pi$ 에서 일정속도 (uniform velocity) $v(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$)로 양자화 (quantization)할 수 있다.

2-2. 반사와 투과

TM파가 그림 1에서와 같이 입사영역 0에서 입사각 θ_0 로 경계면에 입사, θ_r 로 반사하고 투과영역 t 에서 굴절각 θ_t 로 투과한다면 입사파 H_i , 반사파 H_r , 투과파 H_t 의 시간-공간관계는

$$\begin{aligned} \bar{H}_i &= \hat{y} H_i \exp j(\bar{k} \cdot \bar{r}_0 - \omega t) \\ \bar{H}_r &= \hat{y} R H_i \exp j(\bar{k}_r \cdot \bar{r}_0 - \omega_r t) \\ \bar{H}_t &= \hat{y} T H_i \exp j(\bar{k}_t \cdot \bar{r}_0 - \omega_t t) \end{aligned} \quad (3)$$

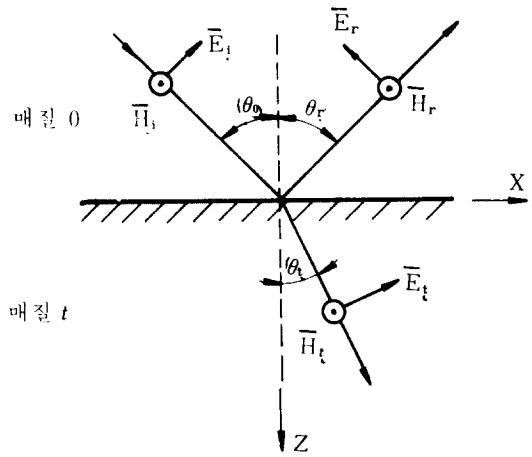


그림 1 TM파의 반사와 투과
Reflection and transmission of TM wave.

로 표시할 수 있다. 여기서 R , T 는 경계면이 일정한속도 $\bar{v}(t_i)$ 로 운동할 때 반사계수 및 투과계수이고, ω , ω_r , ω_t 는 각각 입사파, 반사파 및 투과파의 각속도이며, $\bar{r}_0(t) = \hat{x}x + \hat{z}(z + v(t_i)t)$ 는 위치벡터이다. \bar{k} , \bar{k}_r , \bar{k}_t 는 입사파, 반사파, 투과파의 파동벡터로써

$$\begin{aligned} \bar{k} &= \hat{x}k_x + \hat{z}k_z = \hat{x}k \sin \theta_0 + \hat{z}k \cos \theta_0 \\ \bar{k}_r &= \hat{x}k_{rx} - \hat{z}k_{rz} = \hat{x}k_r \sin \theta_r - \hat{z}k_r \cos \theta_r \\ \bar{k}_t &= \hat{x}k_{tx} + \hat{z}k_{tz} \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 운동계에서 경계조건⁽⁷⁾은

$$\begin{aligned} \hat{n} \times (\bar{E}_0 - \bar{E}_t) - (\hat{n} \cdot \bar{v})(\bar{B}_0 - \bar{B}_t) &= 0 \\ \hat{n} \times (\bar{H}_0 - \bar{H}_t) + (\hat{n} \cdot \bar{v})(\bar{D}_0 - \bar{D}_t) &= \bar{I}_s \\ \hat{n} \cdot (\bar{B}_0 - \bar{B}_t) &= 0 \\ \hat{n} \cdot (\bar{D}_0 - \bar{D}_t) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 첨자 0, t 는 입사, 투과영역을 나타낸다. 운동계에서 경계조건식 (5)를 만족시키려면 위상정합이 되어야 하므로, 입사파, 반사파 및 투과파의 위상은 불변이다. 위상관계는 TE파가 입

사한 경우와 같은 결과를 얻는다⁽⁵⁾.

즉,

$$\begin{aligned} \omega_r &= \gamma^2 \omega (1 - 2\beta \cos \theta_0 + \beta^2) \\ k_{rz} &= \gamma^2 k \{ (1 + \beta^2) \cos \theta_0 - 2\beta \} \\ \omega_t &= \gamma^2 \omega \{ (1 - \beta \cos \theta_0) + \beta Q \} \\ k_{tz} &= \gamma^2 k \{ \beta (1 - \beta \cos \theta_0) + Q \}, \\ Q^2 &= n^2 (1 - \beta \cos \theta_0)^2 - (1 - \beta^2) \sin^2 \theta_0 \quad (6) \\ \gamma^2 &= (1 - \beta^2)^{-1} \\ n^2 &= \epsilon / \epsilon_0 \end{aligned}$$

이다. 문제의 운동계에서 분산관계식은

$$\begin{aligned} k_{ix}^2 + \frac{1 - n^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \left(k_{tz} - \frac{n + \beta}{1 + n\beta} \frac{\omega_t}{c} \right) \\ \cdot \left(k_{tz} - \frac{n - \beta}{n\beta - 1} \frac{\omega_t}{c} \right) = 0 \quad (7) \end{aligned}$$

와 같다⁽⁵⁾⁽⁸⁾.

반사계는 정지계이며 투과영역에서의 전계, 자계는 운동계이다. 식(3), (4)의 관계를 Maxwell-Minkowski 전자과방정식에 적용하여 정지계, 운동계에서 전계 \bar{E} 를 구하면

$$\begin{aligned} \bar{E}_t &= \frac{H_t}{\omega \epsilon_0} (\hat{x} k_z - \hat{z} k_x) \\ \bar{E}_r &= R \frac{H_t}{\omega_r \epsilon_0} (-\hat{x} k_{rz} - \hat{z} k_{rx}) \quad (8) \\ \bar{E}_t &= T \frac{H_t}{\omega_t n^2 \epsilon_0} \left[\hat{x} \left\{ \frac{1 - n^2 \beta^2}{1 - \beta^2} k_{tz} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\beta \omega_t (n^2 - 1)}{c (1 - \beta^2)} \right\} - \hat{z} k_{tx} \right] \end{aligned}$$

과 같이 되고, 구성식과 식(9)와 같은 구성행렬⁽⁸⁾을 이용하여 정지계, 운동계에서 전속밀도 \bar{D} 와 자속밀도 \bar{B} 를 구하면

$$\begin{pmatrix} \bar{D} \\ \bar{B} \end{pmatrix} = \tilde{C} \cdot \begin{pmatrix} \bar{E} \\ \bar{H} \end{pmatrix} \quad (9)$$

단,

$$\tilde{C} = \begin{pmatrix} \epsilon & 0 & 0 & 0 & \eta & 0 \\ 0 & \epsilon & 0 & -\eta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\eta & 0 & \mu & 0 & 0 \\ \eta & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{pmatrix}$$

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0 n^2 (1 - \beta^2)}{1 - n^2 \beta^2}$$

$$\eta = \frac{\beta (n^2 - 1)}{c (1 - n^2 \beta^2)}$$

$$\bar{D}_t = \frac{H_t}{\omega} (\hat{x} k_z - \hat{z} k_x)$$

$$\bar{D}_r = R \frac{H_t}{\omega_r} (-\hat{x} k_{rz} - \hat{z} k_{rx}) \quad (10)$$

$$\bar{D}_t = T \frac{H_t}{\omega_t} (\hat{x} k_{tz} - \hat{z} k_{tx})$$

$$\bar{B}_t = \hat{y} \mu_0 H_t$$

$$\bar{B}_r = \hat{y} R \mu_0 H_t \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{B}_t = -\hat{y} T \frac{H_t}{c n^2 \epsilon_0} \left[\frac{\beta (n^2 - 1)}{1 - \beta^2} \frac{k_{tz}}{\omega_t} + \right. \\ \left. \frac{\beta^2}{c} \frac{(n^2 - 1)^2}{(1 - \beta^2) (1 - n^2 \beta^2)} - \frac{n^2 (1 - \beta^2)}{c (1 - n^2 \beta^2)} \right] \end{aligned}$$

와 같다. 식(3), (8), (10), (11)을 식(5)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{v k_z}{\omega} \right) + \left(1 + \frac{v k_{rz}}{\omega_r} \right) R \\ - \left(1 - \frac{v k_{tz}}{\omega_t} \right) T = 0 \\ \left(v \mu_0 - \frac{k_z}{\epsilon_0 \omega} \right) + \left(v \mu_0 + \frac{k_{rz}}{\epsilon_0 \omega_r} \right) R \\ - \frac{1}{c \epsilon_t} \left(\beta - \frac{c k_{tz}}{\omega_t} \right) T = 0 \quad (12) \end{aligned}$$

와 같이 된다. 식(12)는 TE파가 입사한 경우의 관계식(5)에서 쌍대성(Duality)을 적용하여 직접 구한 식과 일치한다.

식(12)에서 반사계수 R, 투과계수 T를 구하면

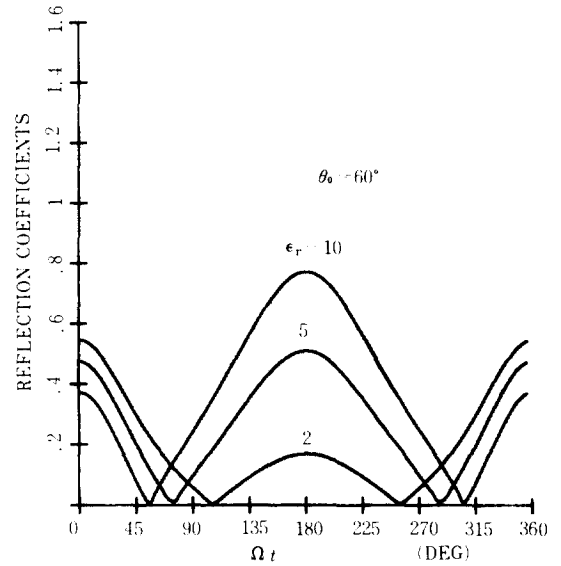
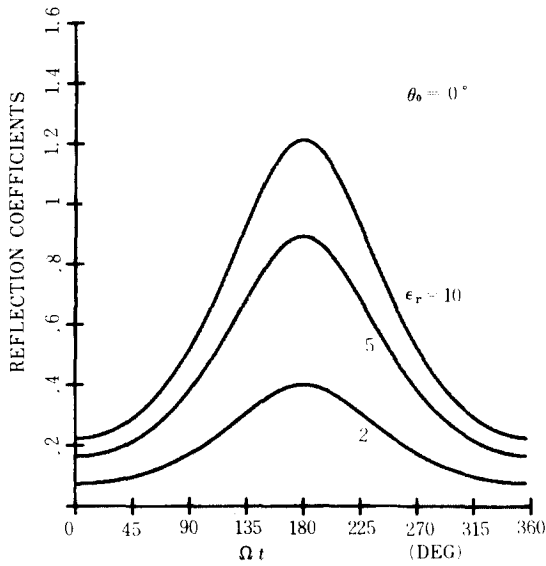
$$R = \frac{1 - 2\beta \cos \theta_0 + \beta^2}{1 - \beta^2} \cdot \frac{n^2 (\cos \theta_0 - \beta) - Q}{n^2 (\cos \theta_0 - \beta) + Q}$$

$$T = \frac{2 (\cos \theta_0 - \beta)}{1 - \beta^2} \cdot \frac{n^2 (1 - \beta \cos \theta_0 + \beta Q)}{n^2 (\cos \theta_0 - \beta) + Q}$$

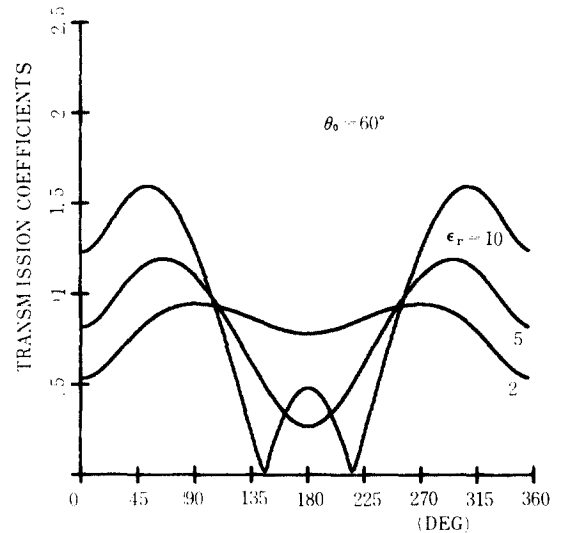
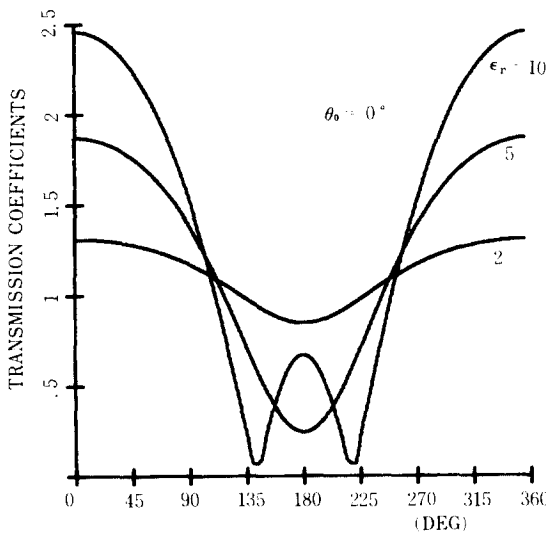
(13)

와 같다.

전력반사율(reflectivity) ρ 와 전력투과율(transmissivity) τ 는 입사전력과 반사전력, 투과전력의 비로 정의되므로



(a) 반사계수
Reflection coefficients.



(b) 투과계수
Transmission coefficients.

그림 2 반사, 투과계수($\beta_{max} = 0.4$)
The reflection and transmission coefficients for $\beta_{max} = 0.4$.

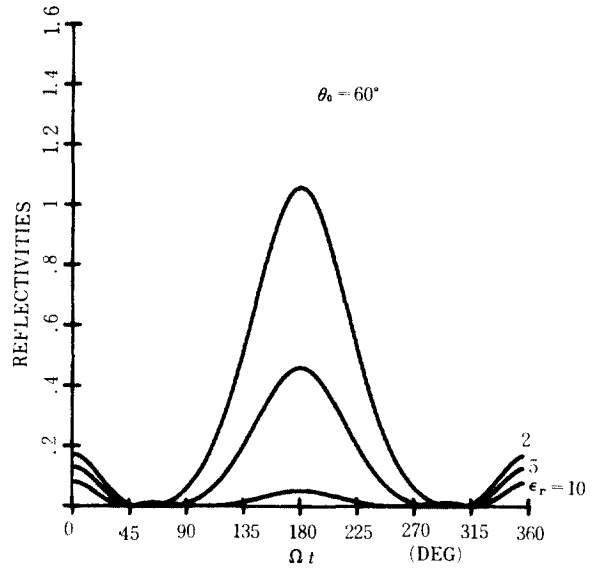
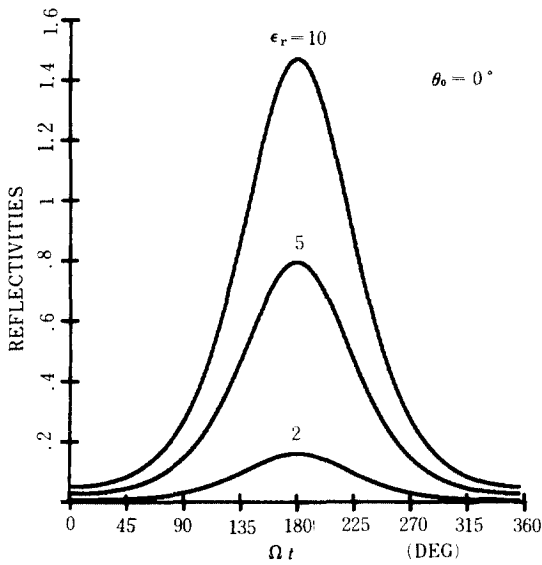
$$\rho \equiv \frac{-\hat{z} \cdot (\vec{E}_r \times \vec{H}_r)}{\hat{z} \cdot (\vec{E}_i \times \vec{H}_i)}$$

$$= R^2 \frac{(1 + \beta^2) \cos \theta_0 - 2\beta}{\cos \theta_0 (1 - 2\beta \cos \theta_0 + \beta^2)} \quad (14)$$

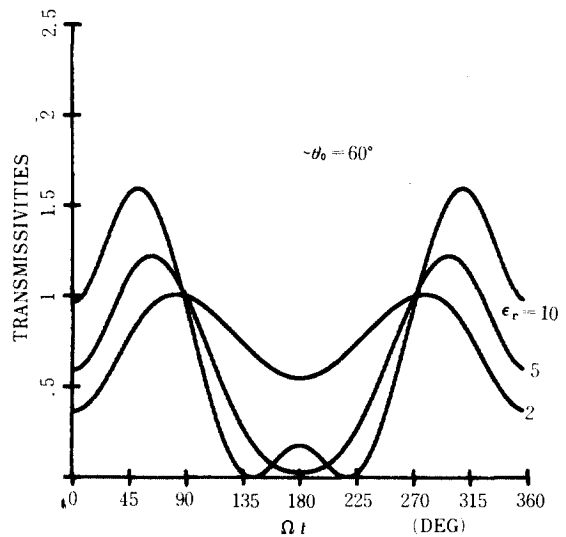
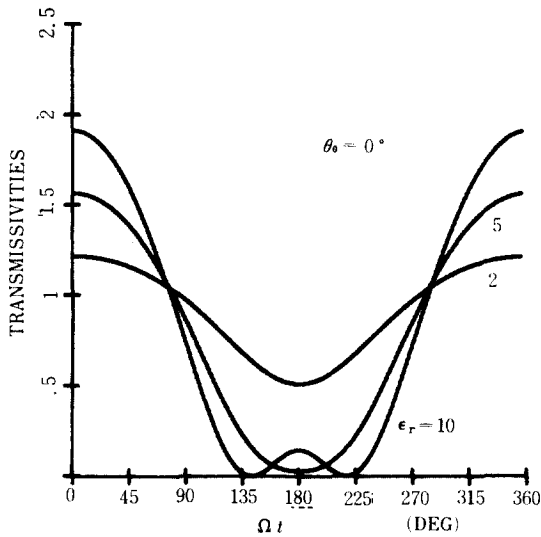
$$\tau \equiv \frac{\hat{z} \cdot (\vec{E}_t \times \vec{H}_t)}{\hat{z} \cdot (\vec{E}_i \times \vec{H}_i)}$$

$$= T^2 \frac{n^2 \beta (1 - \beta \cos \theta_0) + Q}{n^2 \cos \theta_0 (1 - \beta \cos \theta_0 + \beta^2)}$$

와 같다. TE파가 입사한 경우와 비교하면 비슷하지만 비유전율에 관련된 인자가 내포되어 있음을 알 수 있다.



(a) 전력반사율
Reflectivities.



(b) 전력투과율
Transmissivities.

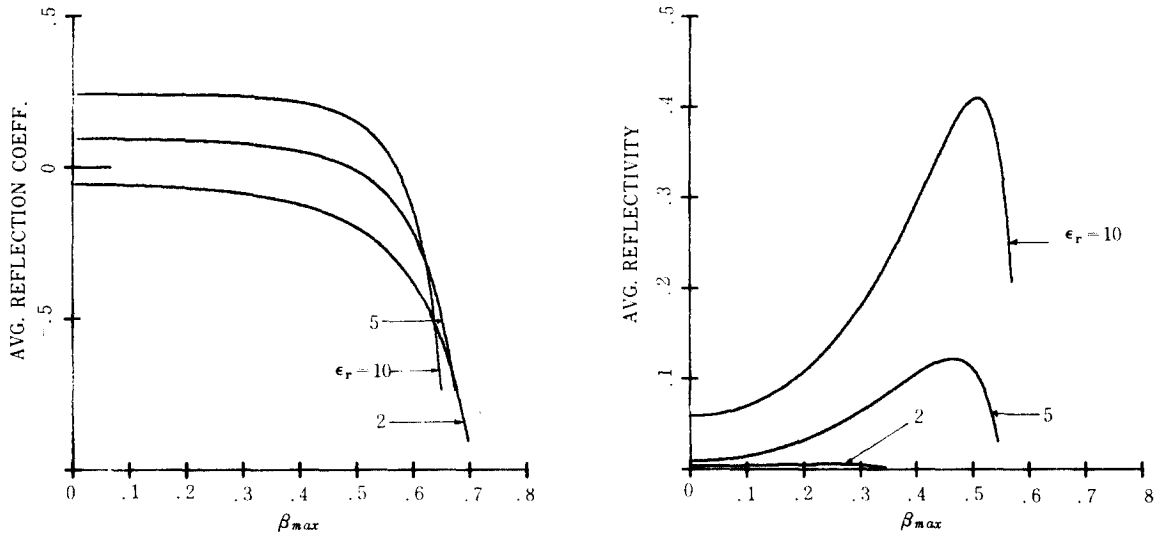
그림 3 전력반사, 투과율 ($\beta_{max} = 0.4$)
The reflectivities and transmissivities for $\beta_{max} = 0.4$.

3. 수치계산 및 검토

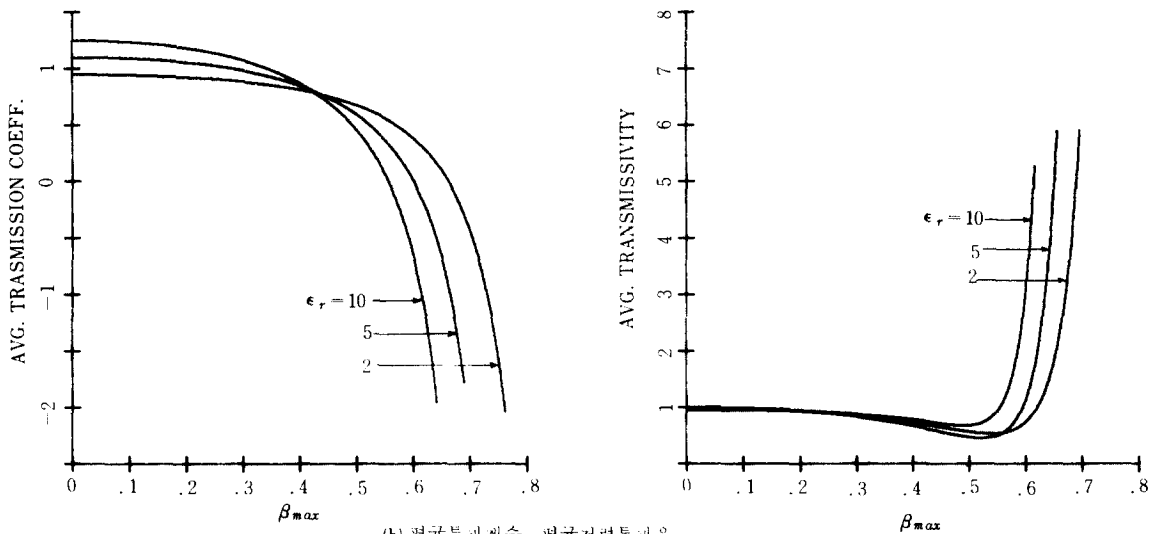
진동하는 유전체 경계면에서 전자파의 반사, 투과특성은 $\varphi = f(\epsilon_r, \beta(t) = \frac{\Omega d}{c} \cos \Omega t, \theta_0)$ 의 형태임을 식(13), 식(14)에서 알 수 있다. 이들 변

수가 반사, 투과특성에 미치는 영향을 $\mu_t \approx \mu_0$ 이라 가정하고 수치계산한 결과를 도시하면 다음과 같다.

그림 2는 TM파가 $\beta_{max} = 0.4$, θ_0 가 $0^\circ, 60^\circ$ 인 경우 비유전율 ϵ_r 의 변화에 대한 반사, 투과계수를 식(13)에 의하여 계산한 결과의 절대치를 도시



(a) 평균반사계수, 평균전력 반사율
Avg. reflection coeff., avg. reflectivity.



(b) 평균투과계수, 평균전력투과율
Avg. transmission coeff., avg. transmissivity.

그림 4 반사계수, 반사율, 투과계수, 투과율의 평균치
The averages of the reflection coeff., reflectivities, transmission coeff., and transmissivities.

한 것이다. 입사각이 증가하면 반사계수가 영이 되는 진동위상(Ω)이 존재하고 TE파가 입사한 경우와 다른 현상을 나타낸다. 한편 진동위상이 영인 경우 즉, 정지한 때에는 $R+T=1$ 이 성립하고 운동하는 경우에는 $R+T \neq 1, 1-n^2\beta^2 < 0$ 인 범위에서는 반사계수, 투과계수의 절대치가 1보다 큰 값을 가지는 것은 TE파의 경우와 같은 경향을 보이고 있다.

그림 3은 $\beta_{max}=0.4$ 이고 전자파의 입사각 $\theta_0 = 0^\circ, 60^\circ$ 인 경우 진동위상의 변화와 전력반사율, 전력투과율의 관계를 식(14)에 의하여 계산한 결과를 도시한 것이다. Cerenkov zone에서는 $\rho + \tau > 1$ 이고 기타의 영역에서는 $\rho + \tau = 1$ 이 성립하는 것은 TE파의 경우와 비슷하지만 입사각 θ_0 가 증가하면 전력반사율, 전력투과율이 TE파의 경우와 비교하여 변화가 단순하지 않음을 알 수 있다. 한편 비유전율 ϵ_r 이 증가하면 전력반사율, 전력투과율의 변화율이 증가함은 TE파의 경우와 비슷하다.

그림 4는 입사각 $\theta_0 = 60^\circ$ 인 경우 최대진동속도와 비유전율을 변수로 하여 반사계수, 투과계수, 전력반사율, 전력투과율을 한 진동주기 ($T = \frac{1}{\Omega}$)에서 평균하여 도시한 것이다. 그림 4(a)에서 평균반사계수는 최대진동속도가 0.5 정도까지는 비유전율 ϵ_r 에 관계없이 그 변화율이 작으나, 평균 전력반사율은 ϵ_r 이 큰 값인 경우에 최대진동속도가 증가함에 따라 그 변화율이 더 크게 증가함을 알 수 있다.

한편 그림 4(b)에서 평균투과계수와 평균전력투과율의 변화는 TE파의 경우와 비슷하며, 투과계수는 $\beta_{max} < 0.45$ 에서 $\epsilon_r = 10$ 일 때 변화율이 가장 크고, 전력투과율은 $\beta_{max} < 0.5$ 에서 $\epsilon_r = 5$ 일 때 변화율이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

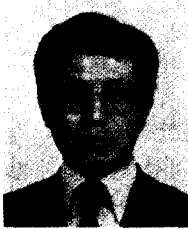
4. 결 론

등방성유전체가 경계면에 수직한 방향으로 진동할 때 경계면에서 TM파로 입사한 전자파의 반사, 투과특성을 임의의 순간에는 등속운동을 한다고 가정하고 Lorentz 변환식을 확대 적용하여 이론적으로 해석하였다.

Cerenkov zone 외의 영역에서는 일반적으로 수직입사한 경우는 TE파에서와 비슷한 결과를 나타내지만 입사각이 증가하면 반사, 투과특성은 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

參 考 文 獻

- (1) A. Ishimaru, "Wave Propagation and Scattering in Random Media," vol. 1-2, Academic Press, 1978.
- (2) P. L. E. Uslenghi, "Electromagnetic Scattering", Academic Press, 1978.
- (3) C. Yeh, "Reflection and Transmission of Electromagnetic Waves by a Moving Dielectric Medium," J. Appl. Physics, vol. 36, no. 11, Nov. 1965.
- (4) S. R. Borkar and R. F. H. Yang, "Reflection of Electromagnetic Waves from Oscillating Surfaces," IEEE Trans. Ant. and Propt., vol. AP-23, pp. 122-127, 1975.
- (5) 구연건, "진동하는 유전체면에서 전자파의 반사와 투과(T E파에 대하여)," 한국통신학회지, 제10권, 제4호, pp. 193-200, 1985.
- (6) J. V. Bladel and D. D. Zutter, "Reflection from Linearly Vibrating Objects," IEEE Trans., Ant. and Propt., vol. AP-29, no. 4, 1981.
- (7) R. C. Costen and D. Adamson, "Three-Dimensional Derivation of the Electrodynamics Jump Condition and Momentum Energy Law at a Moving Boundary", Proc. IEEE, 53, pp 1181-1196, 1965.
- (8) J. A. Kong, "Theory of Electromagnetic Waves," Jhon Wiley & Sons, 1974.



具 然 健(Yeon Geon KOO) 正會員
1939年 3月29日生
1965年 2月：서울大學校電氣工學科卒業
1967年 2月：서울大學校電子工學科卒業
1976年 2月：建國大學校大學院 卒業
1967年 6月～1973年 8月：電波管理局,
韓國電氣通信
研究所勤務

1974年 9月～1979年 2月：檀國大學校電子工學科
1979年 3月～現在：弘益大學校電子工學科 教授



李 正 秀(Jung Soo LEE) 正會員
1944年 11月 1日生
1968年 2月：漢陽大學校電氣工學科卒業
1981年 2月：檀國大學校大學院電子工學
科卒業
1984年 9月～現在：弘益大學校大學院電
子工學科博士課程