

論 文

振動하는 誘電体面에서 電磁波의 反射와 透過

(TE파에 대하여)

正會員 具 然 健*

Reflection and Transmission of Electromagnetic Waves at the Oscillating Dielectric Plane Surface;

(Transverse Electric Wave)

Yeon Geon KOO *Regular Members

要 約 정현적으로 진동하는 유전체 경계면으로 부터 전자파(TE)의 반사와 투과현상을 진동하는 임의의 속감에는 등속운동이라 가정하여 Lorentz 변환을 확대 적용하여 이론적으로 해석하였다. 전자파의 경계면에 입사각, 운동배진의 유전율 및 진동속도의 함수로써 반사, 투과계수, 전력반사, 투과율의 평면치를 수치계산하여 검토하였다.

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

I. 緒 論

전자파의 반사, 투과 또는 산란, 회절 현상은 많은 연구가 되었다. 경계면이 정지하였을 때는 물론이고 일정속도로 운동하는 경우도 전자파의 입사각, 경계면의 매질특성 및 운동속도의 함수로 많은 검토가 있었다. 경계면이 진동할 때에도 경계면의 운동속도가 전자파의 전파속도와 비교하여 매우 작으면 위상만이 반사계의 크기에 영

향을 미친다고 가정하여 준정지근사법(quasi-stationary approximation)을 적용하여 해석한다. 또 가속좌표계에 의한 해석, 주파수영역에서 해석등이 있다. 그러나 준정지근사법은 경계면의 운동속도가 전자파의 전파속도와 비교하여 무시할 수 없는 정도가 되면 상당한 오차가 있고 위상만 고려되므로 경계면이 완전도체가 아닌 유전체의 물리적인 특성을 탐지하는 데는 적합하지 않다^{(1),(2)}. 가속좌표계법⁽³⁾과 주파수영역에서 해석하는 방법은 주파수변조 스펙트럼이므로 복잡하다⁽⁴⁾.

본 논문에서는 유전체가 경계면에 수직한 방향으로 정현적으로 운동할 때 경계면에 임의의 각으로 입사하는 전자파(TE)의 반사와 투과를

* 弘益大學校電子工學科
Dept. of Electronic Engineering Hongik University,
Seoul, 121 Korea.
論文番號 : 85-25(接受 : 1985. 7. 8)

경계면의 유전율, 진동속도의 함수로 고찰하였다. 경계면의 진동속도 \bar{v} 는 어느 순간에 일정하다고 보고 순간적인 등속도(instantaneous uniform velocity)를 가정하고⁽²⁾ Maxwell-Minkowski 전자기 방정식에 의하여 해석 전체의 진동수기에 확대 적용하였다.

II. 理 論

1. 개 요

무한한 유전체평면이 그림 1 과 같이 $x-y$ 좌표면에 평행하게 놓여 있으며 경계면이 임의의 시간 t 에서 z 축상의 점 $(0, 0, r(t))$ 을 통과하는 정현적인 진동하는 경우를 생각한다. 이 경우 변위 $r(t)$ 는

$$r(t) = d \sin \Omega t \tag{1}$$

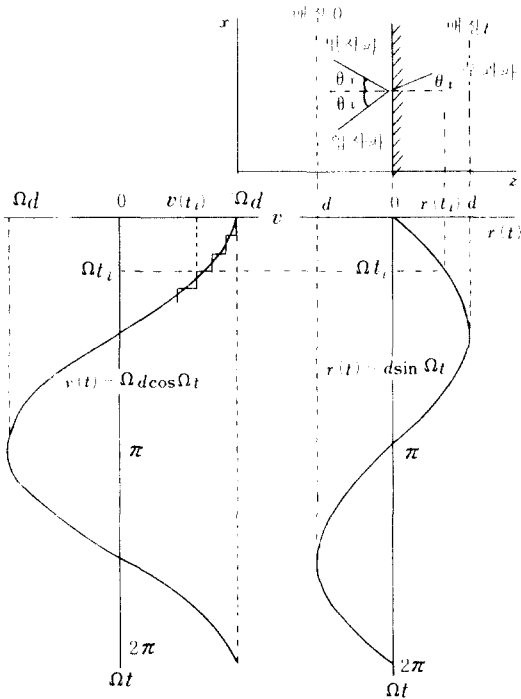


그림 1 문제의 설명도
The geometry of the problem.

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

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

가 된다. 여기서 $\beta(t) = v(t)/c$, c 는 진공중에서 빛의 속도이고 $\beta_{max} = \Omega d/c$ 가 최대진동속도이다. 진동각속도 Ω 가 전자파의 각속도 w 에 비하여 작으면 $0 \leq \Omega t < 2\pi$ 의 구간에서 일정속도(uniform velocity) $\bar{v}(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$)로 양자화(quantization)할 수 있다.

2. 반사와 투과

그림 1에서와 같이 TE파가 입사영역 O 에서 입사각 θ_o 로 경계면에 입사, θ_r 로 반사하고 투과영역 t 에서 굴절각 θ_t 로 투과한다면 입사파 E_i , 반사파 E_r , 투과파 E_t 의 시간-공간(四次元) 관계는

$$\begin{aligned} \bar{E}_i &= \hat{y} E_i \exp j(\bar{k} \cdot \bar{r}_o - wt) \\ \bar{E}_r &= \hat{y} R E_i \exp j(\bar{k}_r \cdot \bar{r}_o - w_r t) \\ \bar{E}_t &= \hat{y} T E_i \exp j(\bar{k}_t \cdot \bar{r}_o - w_t t) \end{aligned} \tag{3}$$

로 표시할 수 있다. 여기서 R, T 는 경계면이 일정속도 $\bar{v}(t_i)$ 로 운동할 때 반사, 투과계수이고 w, w_r, w_t 는 입사, 반사, 투과파의 각속도이고, $\bar{r}_o(t) = \hat{x}x + \hat{z}(z - v(t_i)t)$ 는 위치벡터이다. k, k_r, k_t 는 입사, 반사, 투과파의 파동벡터로써

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

이다. 운동계에서 경계조건⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} \hat{n} \times (\bar{E}_o - \bar{E}_t) - (\hat{n} \cdot \bar{v})(\bar{B}_o - \bar{B}_t) &= 0 \\ \hat{n} \times (\bar{H}_o - \bar{H}_t) + (\hat{n} \cdot \bar{v})(\bar{D}_o - \bar{D}_t) &= \bar{J} \\ \hat{n} \cdot (\bar{B}_o - \bar{B}_t) &= 0 \\ \hat{n} \cdot (\bar{D}_o - \bar{D}_t) &= 0 \end{aligned} \tag{5}$$

이다. 첨자 o, t 는 입사, 투과영역을 나타낸다. 식(5)를 만족하려면 위상은 불변(invariance), 주성합(matching)하여야 하므로

$$\begin{aligned} w_r &= r^2 w (1 - 2\beta \cos \theta_o + \beta^2) \\ k_{rz} &= r^2 k \{(1 + \beta^2) \cos \theta_o - 2\beta\} \\ w_t &= r^2 w \{(1 - \beta \cos \theta_o) + \beta Q\} \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 k_{tz} &= r^2 k \{ \beta (1 - \beta \cos \theta_o) + Q \} \\
 Q^2 &= n^2 (1 - \beta \cos \theta_o)^2 - (1 - \beta^2) \sin^2 \theta_o \\
 r^2 &= (1 - \beta^2)^{-1} \\
 n^2 &= \frac{\epsilon}{\epsilon_o}
 \end{aligned}$$

이다.

분산관계(disperse relations)는 kDB 계에서 구하면 용이하다. 균일매질이 z 축 방향으로 일정 속도로 운동하면 두 종류의 특성파의 분산관계식은 같아지며

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

와 같다⁽⁶⁾. $1 - n^2 \beta^2 > 0$ 이면 투과파는 타원편파(elliptical polarization)이지만 $1 - n^2 \beta^2 < 0$ 이면 쌍곡선편파(hyperbolic polarization)이고 Cerenkov zone⁽⁶⁾이라고한다.

운동계에서 전, 자계를 Maxwell-Minkowski 전자파방정식이나 구성행렬⁽⁶⁾에 의하여 구하면 입사파가 식(3)과 같은 때에

$$\begin{aligned}
 c\bar{B}_t &= \frac{c}{w} (-\hat{x}k_z + \hat{z}k_x) E_t \\
 c\bar{B}_r &= R \frac{c}{w_r} (\hat{x}k_{rz} + \hat{z}k_{rx}) E_t \\
 c\bar{B}_t &= T \frac{c}{w_t} (-\hat{x}k_{tz} + \hat{z}k_{tx}) E_t \\
 c\bar{D}_t &= \hat{y} c \epsilon_o E_t \\
 c\bar{D}_r &= \hat{y} c \epsilon_o R E_t \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c\bar{D}_t &= \hat{y} \frac{1}{cu_t} \left\{ \frac{n^2 - \beta^2}{1 - \beta^2} \frac{\beta(n^2 - 1)}{r_1 - \beta^2} \right. \\
 &\quad \left. \frac{ck_{tz}}{w_t} \right\} TE_t, \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{H}_t &= \frac{1}{\mu_o w} (-\hat{x}k_z + \hat{z}k_x) E_t \\
 \bar{H}_r &= \frac{1}{\mu_o w_r} (\hat{x}k_{rz} + \hat{z}k_{rx}) R E_t \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{H}_t &= \frac{1}{cu_t} \left[\hat{x} \left\{ -\frac{\beta^2(n^2 - 1)}{1 - \beta^2} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{1 - n^2 \beta^2}{1 - \beta^2} \frac{ck_{tz}}{w_t} \right\} \right. \\
 &\quad \left. + \hat{z} \frac{ck_{tx}}{w_t} \right] TE_t
 \end{aligned}$$

을 얻고 식(3), (8), (9), (10)을 식(5)에 대입하고 $\mu_t \approx \mu_o$ 로 하여 정리하면

$$\begin{aligned}
 \left(1 - \frac{vk_z}{w} \right) + \left(1 + \frac{vk_{rz}}{w_r} \right) R \\
 - \left(1 - \frac{vk_{tz}}{w_t} \right) T = 0 \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \left(v\epsilon_o - \frac{k_z}{\mu_o w} \right) + \left(v\epsilon_o + \frac{k_{rz}}{\mu_o w_r} \right) R \\
 - \frac{1}{c\mu_t} \left(\beta - \frac{ck_{tz}}{w_t} \right) T = 0
 \end{aligned}$$

와 같고 반사계수 R , 투과계수 T 를 구하면

$$\begin{aligned}
 R &= -\frac{1 - 2\beta \cos \theta_o + \beta^2}{1 - \beta^2} \frac{\cos \theta_o - \beta - Q}{\cos \theta_o - \beta + Q} \\
 T &= \frac{1 - \beta \cos \theta_o + \beta Q}{1 - \beta^2} \frac{2(\cos \theta_o - \beta)}{\cos \theta_o - \beta + Q} \quad (12)
 \end{aligned}$$

와 같다.

전력반사율(reflectivity) ρ 와 전력투과율(transmissivity) τ 는 입사전력과 반사전력, 투과 전력비이므로,

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{-\hat{z} \cdot (\bar{E}_r \times \bar{H}_r)}{\hat{z} \cdot (\bar{E}_t \times \bar{H}_t)} \\
 &= R^2 \frac{(1 + \beta^2) \cos \theta_o - 2\beta}{\cos \theta_o (1 - 2\beta \cos \theta_o + \beta^2)} \\
 \tau &= \frac{\hat{z} \cdot (\bar{E}_t \times \bar{H}_t)}{\hat{z} \cdot (\bar{E}_t \times \bar{H}_t)} \\
 &= T^2 \frac{n^2 \beta (1 - \beta \cos \theta_o) + Q}{\cos \theta_o (1 - \beta \cos \theta_o + \beta Q)} \quad (13)
 \end{aligned}$$

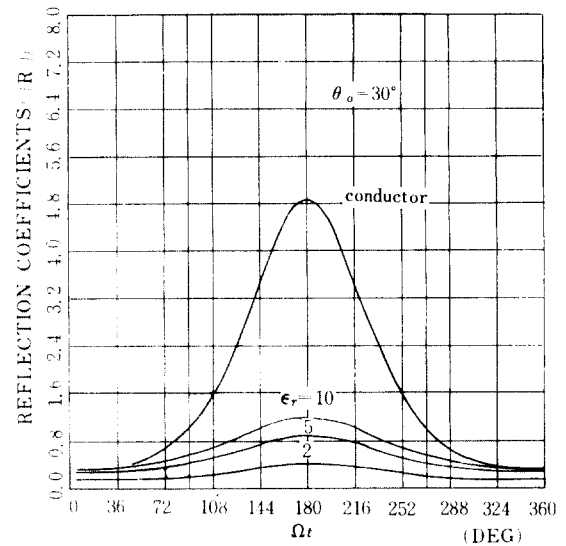
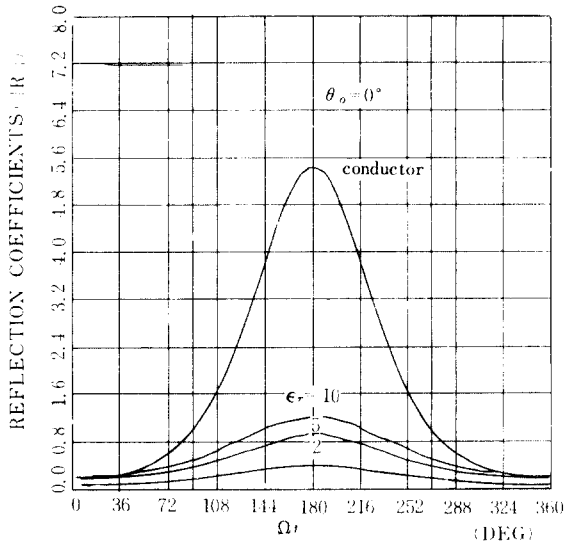
와 같이 얻을 수 있다.

III. 數值計算 및 檢討

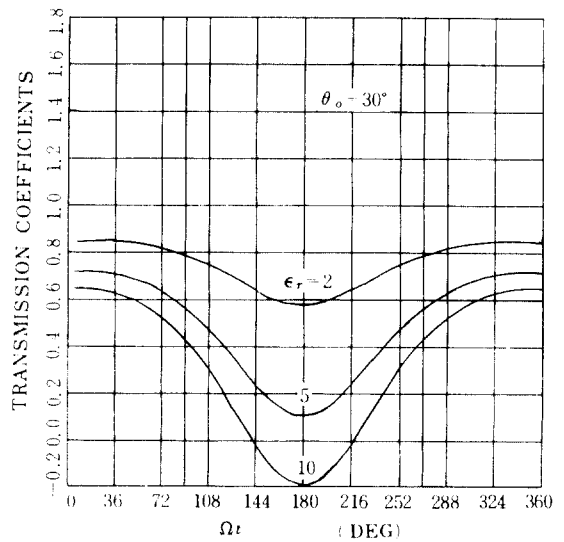
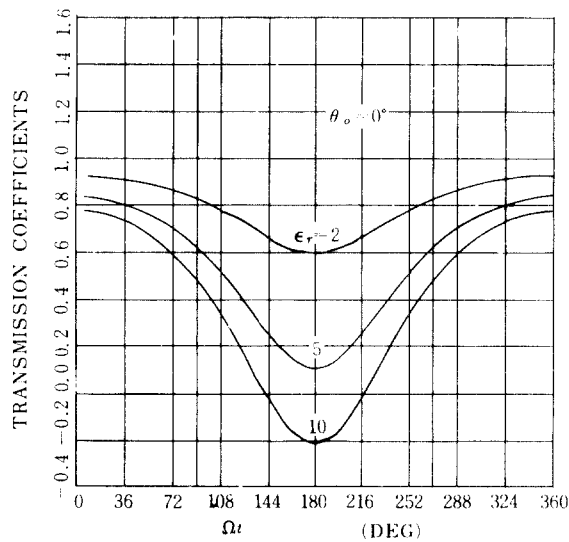
진동하는 유전체 경계면에서 전자파의 반사, 투과특성은 식(12), (13)에서 비유전율 $\epsilon_r (=n^2)$, 전자파의 입사각 θ_o , 진동각속도 Ω , 진동진폭 d 의 함수인 진동속도 $v = c\beta(t)$ 와 함수관계가 있음을 알 수 있다. 이들 변수가 반사, 투과특성에 미치는

영향을 $\mu_t \approx \mu_o$ 인 경우 수치계산한 결과를 도시하면 다음과 같다.

그림 2는 입사각 $\theta_o = 0^\circ, 30^\circ$ 이고 $\beta_{max} = 0.4$ 인 때 비유전율 ϵ_r 의 변화에 대한 반사, 투과계수를 식(12)에 의하여 계산한 결과를 도시한 것이다. 반사계수는 입사각 θ_o 가 증가하면 진동속도의 변화가 작고 비유전율 ϵ_r 이 증가하면 변화가



(a) 반사 계수



(b) 투과 계수

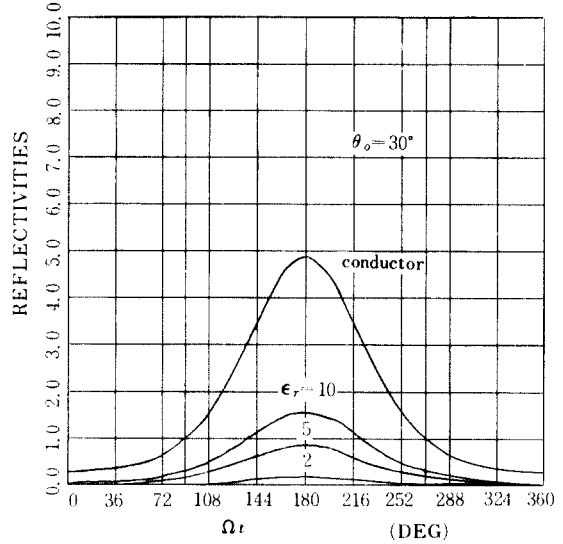
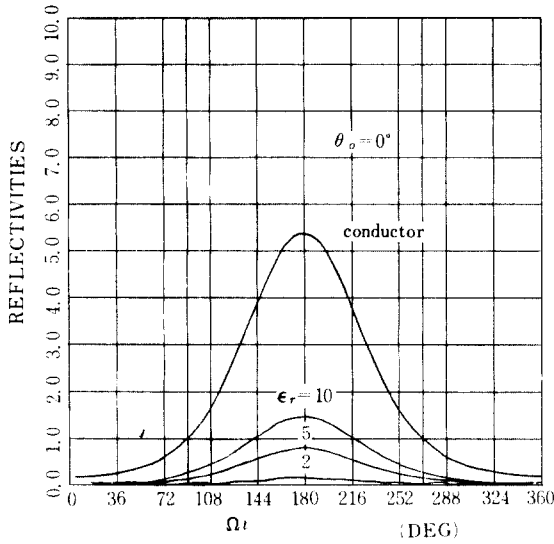
그림 2 반사, 투과계수 ($\beta_{max} \approx 0.4$)

The reflection and transmission coefficients for $\beta_{max} = 0.4$

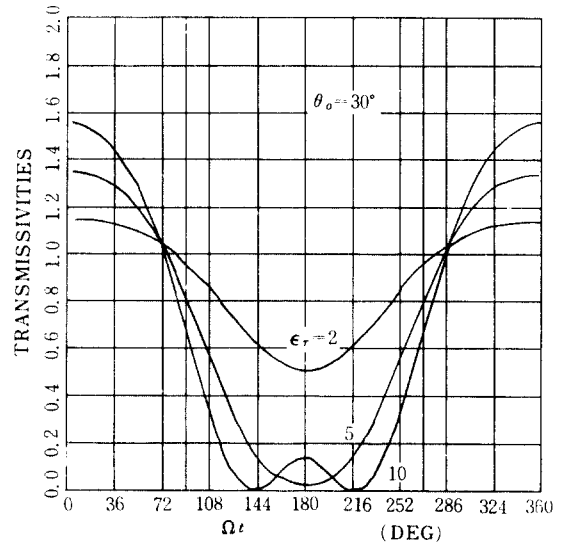
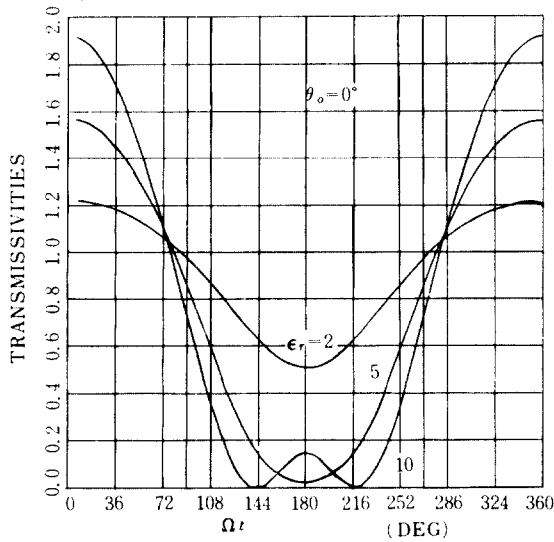
크고 작은 진동속도에서 반사계수의 절대치가 1보다 큰 값을 갖음을 알 수 있다. 이는 식 (7)에서 나타난 타원편파와 쌍곡선편파의 경계($1 - n^2 \beta^2 = 0$)의 변화 때문이다. 투과계수가 영보다 작은 값을 갖는 경우도 같은 이론에 의해서이다. 정지한 경우 ($\Omega t = 90^\circ, 270^\circ$)에는 $1 + R = T$ 의 관계가 성립하지만 기타의 경우는 $1 + R \neq T$ 임

을 알 수 있다. $\epsilon_{r \rightarrow \infty}$ 는 도체와 대응되므로 도체인 경우도 비교하였다.

그림 3은 $\beta_{max} = 0.4$ 이고 전자파의 입사각 $\theta_o = 0^\circ, 30^\circ$ 인 경우 $\beta(t)$ 속 진동속도의 변화가 전력 반사율, 전력투과율을 식(13)에 의해 계산한 결과를 도시한 것이다. Cerenkove zone에서는 $\rho + \tau > 1$ 이고 기타의 영역에서는 $\rho + \tau = 1$ 이 성립

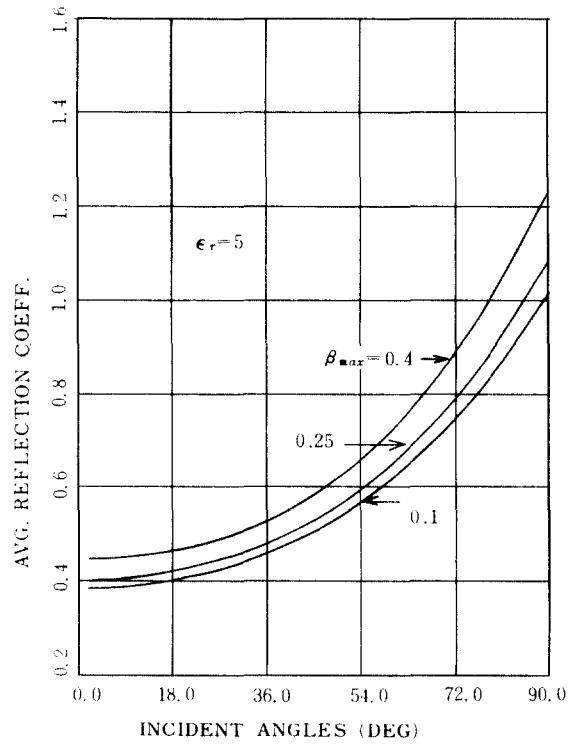
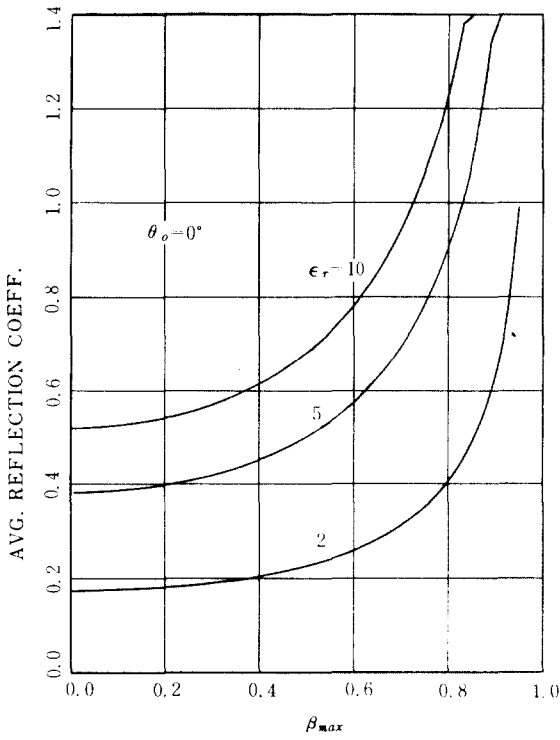


(a) 전력반사율

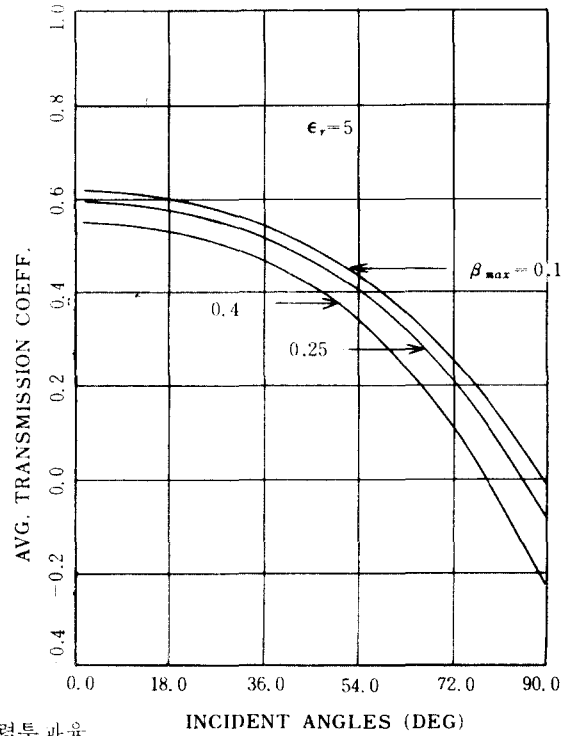
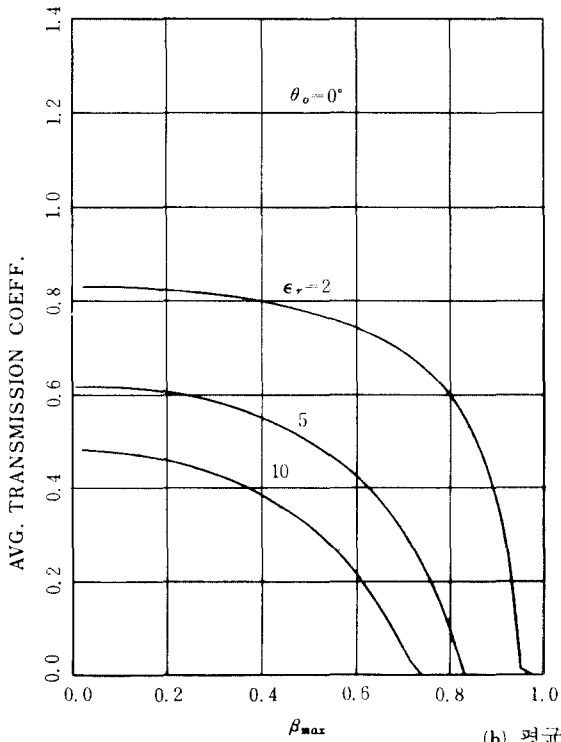


(b) 전력투과율

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



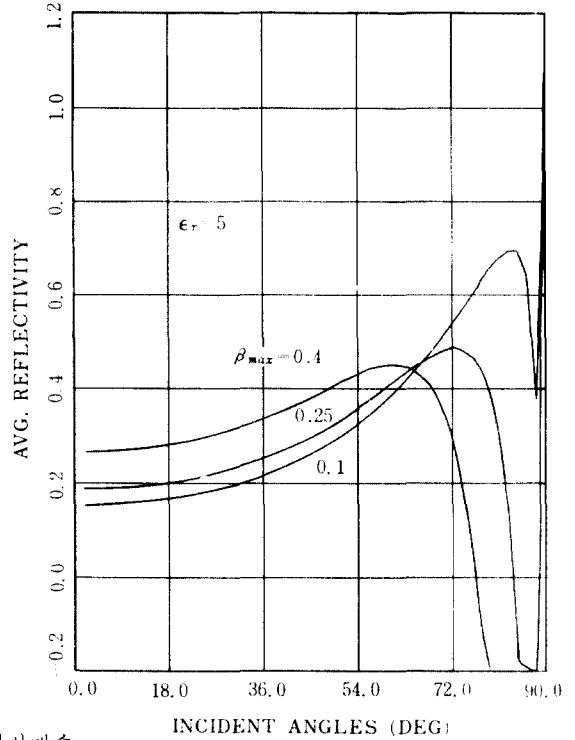
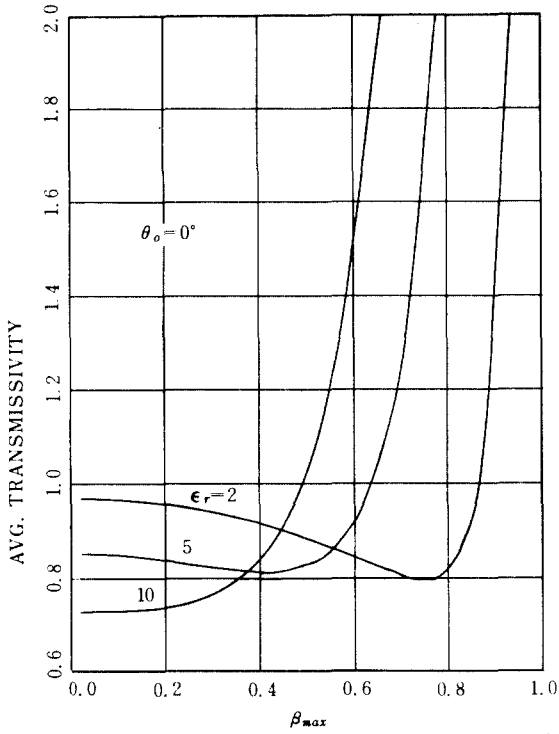
(a) 평균전력반사율



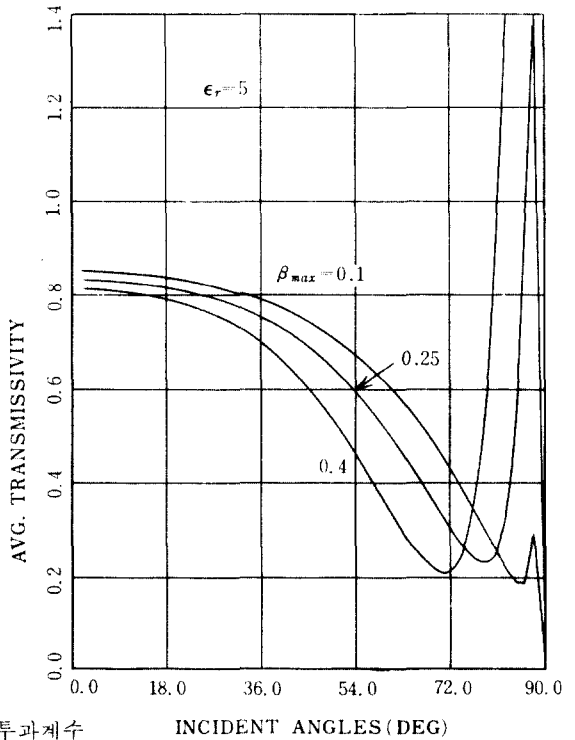
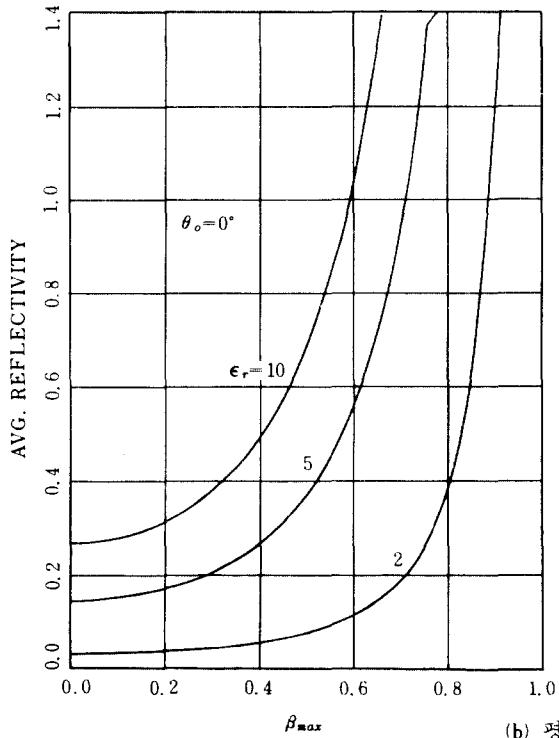
(b) 평균전력투과율

그림 4 상균반사, 투과계수

The averages of the reflection and transmission coefficients.



(a) 평균반사계수



(b) 평균투과계수

그림 5 평균전력반사, 투과율

The averages of the reflectivities and transmissivities.

함을 알 수 있다. 전자파의 전자방향과 유전체의 운동방향이 반대 ($\beta(t) < 0$) 이면 같은 방향 ($\beta(t) > 0$) 인 경우와 비교하여 반사, 투과특성에 영향을 많이 미치는 것을 알 수 있다.

그림 4 는 최대진동속도, 비유전율, 입사각을 변수로 하여 반사계수와 투과계수를 한 진동주기 ($T = \frac{1}{\Omega}$) 에서 평균한 값을 도시한 것이다. 비유전율이 증가하면 Cerenkov zone 의 경계가 되는 진동속도는 반대로 감소하고 입사각이 증가하고 경우도 같은 현상이 일어남을 보여 주고 있다. 즉 θ_0, ϵ_r 이 증가하면 평균반사계수의 절대치가 1 보다 커지고 평균투과계수가 0 보다 작아지는 β_{max} 는 감소함을 알 수 있다.

그림 5 는 유전체매질의 한 진동주기동안의 평균전력반사율, 평균전력투과율을 식(13)에서 비유전율, 입사각, 최대진동속도를 변수로하여 도시한 것이다. 정지한 경우 ($\beta(t) = 0$) 에만 평균전력반사율과 평균전력투과율의 합이 1 이고 유전체면이 운동 ($\beta(t) \neq 0$) 하면 1 이 되지 않음을 알 수 있다. 또 ϵ_r, θ_0 이 증가하면 Cerenkov zone 에 이는 β_{max} 의 값은 반대로 감소함을 알 수 있다.

IV. 結 論

등방성유전체 매질이 경계면에 수직한 방향으로 선형적인 진동을 할 때 경계면에서 전자파의 반사, 투과특성을 임의의 순간에는 등속운동을

한다고 가정하고 Lorentz 변환식을 확대 적용하여 이론적으로 해석하였다.

유전체 매질의 비유전율의 근 ($\sqrt{\epsilon_r}$) 이 상대적인 운동속도 ($\beta(t)$) 의 역수보다 크지 않은 범위 (Cerenkov zone 외의 영역) 에서는 전자파의 반사, 투과특성에 의하여 운동하는 유전체매질의 특성을 탐지할 수 있음을 발견되었다. 전자파의 경계면에 입사각도 반사, 투과특성에 영향을 미치므로 유전체면이 대략적으로 평면이면 경계면의 관찰도 가능함을 발견하였다.

參 考 文 獻

- (1) S. R. Borkar and R. F. H. Yang, "Reflection of Electromagnetic Waves from Oscillating Surface," IEEE Trans. Ant. and Prop., vol. AP-23, pp 122-127, 1975.
- (2) J. V. Bladel and D. D. Zutter, "Reflection from Linearly Vibrating Objects, Plane Mirrors at Normal Incidence," IEEE Trans. Ant. and Prop., vol. AP-29, No. 4, 1981.
- (3) K. Tanaka, "Relativistic Study of Electromagnetic Waves in the Accelerated Dielectric Medium," J. Appl. Physics, vol. 49, No. 8, Aug. 1978.
- (4) P. Day and H. Gruenberg, "Energy Relations for plane waves Reflected from Moving Media," J. Appl. Physics, vol. 38, 1967.
- (5) R. C. Costen and D. Adamson, "Three-Dimensional Derivation of the Electrodynamics Jump Conditions and Momentum-Energy Laws at a Moving Boundary," Proc. IEEE, 53, pp1181-1196, 1965.
- (6) J. A. Kong, "Theory of Electromagnetic Waves," John 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