

랜덤 선로상의 광 국재현상에 관한 해석(2) : 시뮬레이션

최영규†

신라대학교 공과대학 광전자공학과

⊕ 617-736 부산광역시 사상구 패법동 산 1-1

(2003년 3월 13일 받음, 2003년 7월 14일 수정본 받음)

전파정수가 불규칙하게 존재하는 선로를 설정하고, 선로 상의 파동함수의 해가 국재성을 나타내는 원인과 그 조건에 대하여 확률함수를 이용하여 해석하였다. 랜덤한 매질로는 특성 임피던스가 불규칙하게 변동하는 전송선로를 설정하고, 이 선로 상에서의 전압파나 전류파의 국재현상에 대하여 살펴보았다. 수치해석을 실시한 결과, 랜덤 선로 중에 국재하는 해가 존재하는 것이 확인되었으며, 전류원을 삽입하여 선로를 강제 여진시킨 경우에도 선로 상에 전압파가 국재하는 것을 알 수 있었다. 선로 전체에 손실을 설정한 경우에 대한 해석 결과에서는 국재가 존재하는 위치의 파가 가장 큰 영향을 받는다는 사실에서, 광의 국재는 파동이 반사를 반복하는 것에 의해 나타난다는 것을 알 수 있었다.

주제어 : Anderson localization, photon localization, random potential.

I. 서 론

광의 국재현상 연구에 대한 궁극적인 목적은 광의 강한 국재현상에 대한 이론적 규명과 그 실현에 있다고 할 수 있다. 에너지대 구조가 흩어져 있는 계의 전자파동함수의 앤더슨 국재처럼 어떤 종류의 유전체의 미세구조 속에서는 광의 국재현상이 일어난다.^[1-3] 이러한 계에서는 고전 광학적으로 뿐만 아니라 양자전자기학적인 의미에서도 새로운 현상이 일어나는 것으로 알려져 있다.^[4]

전자의 국재화는 불규칙한 포텐셜에 의해서 산란된 전자파 사이의 간섭이 원인이 되어 일어나는 현상이다.^[5] 앤더슨 국재는 이러한 전자의 파동적 성질이 일으키는 현상이기 때문에, 전파정수가 랜덤하게 분포하는 무한 길이의 매질(이하 이것을 랜덤한 매질이라 함)내의 전자파, 또는 특성임피던스가 불규칙하게 분포하는 전송선로(랜덤한 선로)상의 전압파동 등, 여러 종류의 파동에서 앤더슨 국재와 유사한 국재현상이 일어날 수 있다.^[6-8]

본 논문의 전반부에 해당하는 저자의 랜덤 선로상의 광 국재현상에 있어서 파동방정식의 해의 국재성에 대하여 고찰한 연구논문^[9]에서는 전파정수가 불규칙하게 존재하는 선로를 설정하고, 이 선로 상에서 파동함수의 해의 성질을 확률함수를 이용하여 수학적으로 해석함으로써 파동방정식의 해가 국재성을 나타내는 원인과 그 조건에 대하여 해석하였다. 본 논문에서는 수치계산으로 랜덤한 매질을 설정하여 국재하는 해를 구하고, 그 해의 성질에 대하여 수치해석을 하였다. 랜덤한 매질로는 특성 임피던스가 불규칙하게 변동하는 전송선로를 설정하고 이 선로 상에서의 전압파나 전류파의 국재현상에 대하여 살펴보았다.

계산의 편의상 국재현상의 수치해석 모델로는 특성임피던스가 불규칙하게 변하는 전송선로를 선택하고, 이것을 4단자 회로망의 집합으로 간주하고 계산을 하였다.

제 2절에서는 랜덤한 선로를 특성임피던스가 불규칙하게 분포되어 있는 4단자망으로 모델링하여 선로상의 특성임피던스를 배열하는 방법에 대하여 설명하였다. 제 3절에서는 선로의 양단을 적당한 리액턴스 등으로 종단시킨 랜덤 선로에는 공진하는 주파수가 존재하게 되므로 이러한 공진 주파수를 구하는 방법에 대해서 살펴보았다. 제 4절에서는 랜덤 선로의 어느 한 위치에 가변 주파수의 교류 전류원을 삽입하고 이것을 여진하는 경우에 대하여, 제 5절에서는 600개의 선로를 불규칙하게 접속한 랜덤 선로를 모델로 계산하였다. 선로는 2종류의 선로를 이용하여 각각의 특성임피던스를 $75(\Omega)$, $40(\Omega)$ 으로 정하고 발생확률을 동등하게 하여 배열한 모델을 이용하였다.

II. 랜덤 선로의 모델링

송전선 또는 통신선과 같은 전송선로는 분포정수 회로로 취급하는 경우 그림 1과 같이 미소한 집중정수 선로가 무수히 접속되어 있는 것으로 표현할 수 있다.

이러한 선로에 있어서 전압은 참고논문[9]의 식 (2)와 같은 파동함수로 표현된다. 또, 전송선로의 어떤 구간 내의 전파정수나 특성임피던스가 일정하면 그림 2와 같이 4단자망 회로로 모델화할 수가 있다.^[10] 입력을 V_{in} , I_{in} , 출력을 V_{out} , I_{out} 이라 하면,

$$\begin{bmatrix} V_{out} \\ I_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(qx) & -iZ\sinh(qx) \\ -i\frac{1}{Z}\sinh(qx) & \cosh(qx) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{in} \\ I_{in} \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 얻어진다. 여기서, 선로가 무손실이라면,

†E-mail: ykchoi@silla.ac.kr

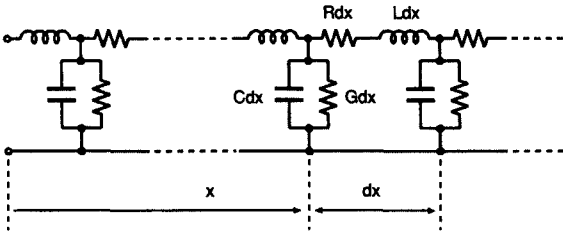


그림 1. 전송회로의 집중정수회로 표현.

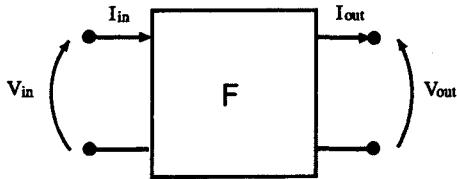


그림 2. 4단자 회로망.

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

$$q = i\omega\sqrt{LC} = i\beta \quad (3)$$

로 되어 식 (1)의 행렬부분은

$$F = \begin{bmatrix} \cos(\beta x) & -iZ\sin(\beta x) \\ -i\frac{1}{Z}\sin(\beta x) & \cos(\beta x) \end{bmatrix} \quad (4)$$

로 된다. 이후로는 이러한 선로행렬을 **F**매트릭스라 한다.

지금부터 랜덤한 임피던스의 분포를 가진 선로를 4단자망 회로모델을 이용하여 표현하는 방법에 대해서 살펴보자. 랜덤 선로는 기본적으로 4단자망 회로모델을 여러 개 연결하여 실현할 수 있으나, 연결하는 선로의 특성임피던스를 결정하는 방법으로는

(1) 접속하는 선로의 1구간 마다 특성임피던스를 랜덤하게 변화시킨다.

(2) 2, 3종류의 서로 특성임피던스가 다른 선로들을 준비하여 어떠한 선로를 접속할 것인가를 랜덤하게 결정한다.

등의 방법을 생각할 수 있다. 이러한 방법 외에도 여러 가지로 랜덤한 회로를 실현할 수 있으나, 여기서는 (2)의 방법을 이용하기로 한다. 예를 들어 2종류의 선로를 준비하고 이러한 선로의 **F**매트릭스를 각각 **A**, **B**로 나타낸다. 선로를 그림 3과 같이 **N**개 랜덤하게 연결할 경우, 선로의 **F**매트릭스는 **N**개의 행렬의 곱

$$F = F_N F_{N-1} F_{N-2} F_{N-3} \dots F_2 F_1 = ABAA \dots AB \quad (5)$$

로 표현된다.

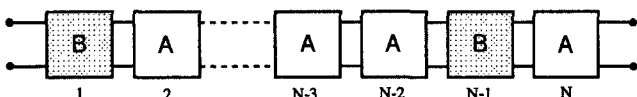


그림 3. 랜덤 선로의 모델.

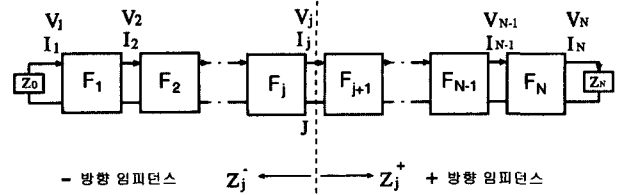


그림 4. 선로중의 한점에서 좌우를 본 임피던스.

여기서 2종류의 서로 다른 선로의 **F**매트릭스를 각각 **A**, **B**로 나타냈으나 이것은 무손실의 경우 식 (2)처럼 선로의 특성임피던스 **Z**와 선로의 양단의 위상차를 나타내는 βx 의 2가지의 요소에만 관계한다. 여기서는 βx 가 같고 **Z**가 다른 **A**, **B**를 선택하여 **A**, **B**의 선로 특성임피던스를 각각 Z_A , Z_B 라 하면

$$A = \begin{bmatrix} \cos \theta & -iZ_A \sin \theta \\ -i\frac{1}{Z_A} \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} \cos \theta & -iZ_B \sin \theta \\ -i\frac{1}{Z_B} \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\theta = \beta_A x_A = \beta_B x_B \quad (8)$$

로 된다. 식 (7)에서 θ 는 식 (3)에서 명백한 것처럼 주파수에 비례하며, 주파수에 관련된 다른 요소가 없으므로 β 를 주파수에 해당하는 파라미터로 취급할 수 있다.

III. 랜덤 선로의 공진

선로의 양단을 적당한 리액턴스 등으로 중단시킨 랜덤 선로에는 공진하는 주파수가 존재한다. 이러한 공진 주파수를 구하는 방법에 대해서 살펴보자.

그림 4처럼 **N**개의 선로를 접속한 모델로 좌우의 중단에 각각 Z_0 , Z_N 의 리액턴스를 연결한 경우, 좌측에서 **k**번째의 선로의 **F**매트릭스를 F_k 로 나타내면, 식 (1)처럼

$$\begin{bmatrix} V_k \\ I_k \end{bmatrix} = F_k \begin{bmatrix} V_{k-1} \\ I_{k-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

이 성립한다. 좌우 각각의 중단 임피던스로서 Z_0 , Z_N 을 접속하고 있으므로 V_0 , I_0 와 V_N , I_N 에 대해서는

$$V_0 = -Z_0 I_0 \quad (10)$$

$$V_N = Z_N I_N \quad (11)$$

으로 되며, 식 (9)과 식 (10)에 의해서 그림 4의 점 **J**에서는

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_j \\ I_j \end{bmatrix} &= F_j \begin{bmatrix} V_{j-1} \\ I_{j-1} \end{bmatrix} = F_j F_{j-1} F_{j-2} \dots F_2 F_1 \begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \\ &\equiv F^j \begin{bmatrix} -Z_0 I_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

로 된다. 또, 그림 4의 점 J에서 좌측을 본 임피던스는 식 (12)에서

$$Z_j^- = \frac{V_j}{-I_j} = \frac{-Z_0[F^j]_{11} + [F^j]_{12}}{Z_0[F^j]_{21} + [F^j]_{22}} \quad (13)$$

가 된다. 같은 방법으로 점 J에서 우측으로는

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_j \\ -I_j \end{bmatrix} &= F_{j+1} \begin{bmatrix} V_{j+1} \\ -I_{j+1} \end{bmatrix} \\ &= F_{j+1} F_{j+2} F_{j+3} \dots F_{N-1} F_N \begin{bmatrix} V_N \\ -I_N \end{bmatrix} \\ &= G^j \begin{bmatrix} -Z_N I_N \\ -I_N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

으로 되어, 점 J에서 우측을 본 임피던스도

$$Z_j^+ = \frac{V_j}{I_j} = \frac{-Z_0[G^j]_{11} + [G^j]_{12}}{Z_0[G^j]_{21} - [G^j]_{22}} \quad (15)$$

로 된다. θ 가 주파수에 해당되므로 Z_j^-, Z_j^+ 가 주파수 함수로 되는 것은 명백하다. Z_j^-, Z_j^+ 를 $Z_j^-(\theta), Z_j^+(\theta)$ 로 고쳐 쓰면, 공진주파수에 있어서

$$Z_j^-(\theta) + Z_j^+(\theta) = 0 \quad (16)$$

이 성립된다. 앞 절에서 설명한 것처럼 θ 는 주파수에 해당하기 때문에, 식 (16)이 성립하는 θ 를 구하는 것은 공진주파수를 구하는 것과 같다. 그러나 종단에는 리액턴스만을 접속하기 때문에, Z_j^-, Z_j^+ 는 모두 리액턴스성분(순허수)으로 되므로, 공진 조건인 식 (16)의 평가는 허수성분에 대해서만 실시하면 충분하다. 또한, 해석하는 선로에 있어서 파동은 종단을 향해서 감쇠하는 경우를 생각하기 때문에 단락시키는 것이 적당하다.

IV. 랜덤 선로의 여진

랜덤 선로의 어느 한 위치에 가변 주파수의 교류 전류원을 삽입하고 이것을 여진하는 경우를 생각해 보자. 앞 절에서는 랜덤 선로가 무손실이고 종단에 리액턴스만을 접속하는 경우를 살펴보았으나, 이대로 여진 시키면 발산하게 된다. 따라서 선로에는 어느 정도의 손실을 설정해야 하는데, 이러한 방법으로는

- (1) 접속하는 각 선로에 감쇄정수를 설정한다.
- (2) 종단에 저항을 접속한다.

등을 생각할 수 있다. (1)은 실제의 선로의 모델로서 유효하고, (2)는 랜덤 선로 내에는 손실이 없다는 점에서 앞 절에서 도출된 공진해와 비교하기가 쉬워진다는 이점이 있다.

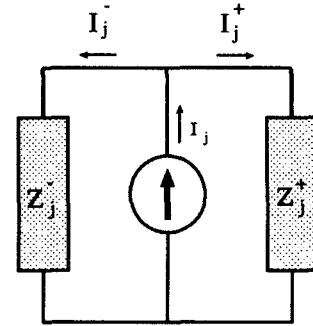


그림 5. 여진시의 등가회로.

그림 4의 점 J의 위치에 전류원을 넣고 선로를 여진 시켜보면, 이 때 점 J에서 좌우를 본 임피던스는 앞 절에서 이용한 방법과 같이 식 (13), 식 (15)에서 구할 수가 있다.

언어지는 $Z_j^-(\theta), Z_j^+(\theta)$ 와 전류원은 그림 5와 같은 등가회로로 표현할 수 있으므로 전류원에서 보면 $Z_j^-(\theta), Z_j^+(\theta)$ 의 병렬임피던스는

$$Z_j(\theta) = \frac{Z_j^-(\theta)Z_j^+(\theta)}{Z_j^-(\theta) + Z_j^+(\theta)} \quad (17)$$

로 된다. 식 (17)에서 명백한 것처럼 $Z_j^-(\theta) + Z_j^+(\theta)$ 를 만족하는 θ 는 공진주파수에 대응하는 것이다. 식 (17)에서 점 J의 전압은

$$\begin{aligned} V_j(\theta) &= Z_j(\theta)I_j(\theta) \\ &= \frac{Z_j^-(\theta)Z_j^+(\theta)}{Z_j^-(\theta) + Z_j^+(\theta)}I_j(\theta) \end{aligned} \quad (18)$$

로 표현된다. 또, 점 J에서 좌우를 향하는 전류를 각각, $I_j^-(\theta), I_j^+(\theta)$ 로 표현하면,

$$\begin{aligned} I_j^-(\theta) &= \frac{V_j(\theta)}{Z_j^-(\theta)} \\ &= \frac{Z_j^-(\theta)}{Z_j^-(\theta) + Z_j^+(\theta)}I_j(\theta) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} I_j^+(\theta) &= I_j(\theta) - I_j^-(\theta) \\ &= \frac{Z_j^+(\theta)}{Z_j^-(\theta) + Z_j^+(\theta)}I_j(\theta) \end{aligned} \quad (20)$$

로 되며, 식 (9)을 이용하여 계산하면, 선로 전체에 대한 각 부분의 전압과 전류의 값이 구해진다.

한편, 지금까지는 전류원을 어떤 위치에 한 개만 삽입한 경우를 생각하였으나, 랜덤한 선로의 여러 곳에 전류원을 삽입한 모델인 경우에는 선로상의 각부의 전압이 한 개의 전류원만 존재한 경우에 대한 전압의 중첩으로 얻을 수 있다.

전류분포로서 $P(=1, 2, 3, \dots, N)$ 점의 위치에 I_p 를 삽입하여 여진한 경우, 각 $Q(=1, 2, 3, \dots, N)$ 에서의 전압분포는

$$V_Q = \sum_{P=1}^N Z(Q, P) I_P \quad (0 \leq Q \leq N) \quad (21)$$

로 주어진다. 여기서 $Z(Q, P)$ 는 점 P 에 I_P 를 대입하였을 때, 이 I_P 가 Q 점의 전압에 미치는 영향을 나타내는 인자이다.

V. 수치계산

5.1. 랜덤 선로의 공진해

랜덤한 선로의 모델로는 랜덤하게 600개의 선로를 접속한 것을 이용하여 수치계산을 하였다. 선로는 2종류의 선로를 이용하여 각각의 특성임피던스를 $75(\Omega)$, $40(\Omega)$ 으로 정하고 발생 확률을 동등하게 하여 랜덤하게 배열하였다.

먼저, 2종류의 선로를 랜덤하게 배열한 경우를 살펴보자. 선로의 중심에서 좌우를 본 임피던스의 허수부를 그림 7에 보였으나 아주 조밀하게 밀집되어 있다. 결과를 비교하기 위하여 30개를 교대로 배열한 선로에 대해서 같은 방법으로 계산하면 그림 6과 같이 된다. 접속수가 30개에서 600개로 증가함에 따라 교점, 즉, 해의 수가 아주 많아진다는 것을 알 수

있다. 접속 수를 더욱 증가시키면 그 접속 수만큼 더 해가 많아지게 된다.

그림 7을 부분적으로 확대해서 보면, 그림 8이나 그림 9에서 알 수 있는 것처럼 아주 급격한 변화를 보이고 있음을 알 수 있다. 주파수에 대한 임피던스를 플롯하여 알 수 있는 것은 그림 8의 원으로 표시한 내부처럼 완만한 변화를 하면 보이는 점이라도 크게 발산한다는 것이다. 이것은 접속 수가 적을 때는 없는 현상으로 해석을 어렵게 하는 중요한 요인 중 하나이다. 이러한 경향은 선로를 증가시키면 증가시킬수록 현저하게 나타나므로 주의할 필요가 있다.

여기서 이용한 랜덤 선로의 공진주파수 중 주변의 해를 예로써 전압파형을 플롯하여 그림 10, 11에 나타냈다. 그림 10에서는 전압이 가장 커지는 곳과 종단 부근과는 10자리 정도의 차이가 있다. 따라서 600개 이상의 선로를 접속한 모델의 해를 구하는 데는 더욱 더 정밀도를 높일 필요가 있다.

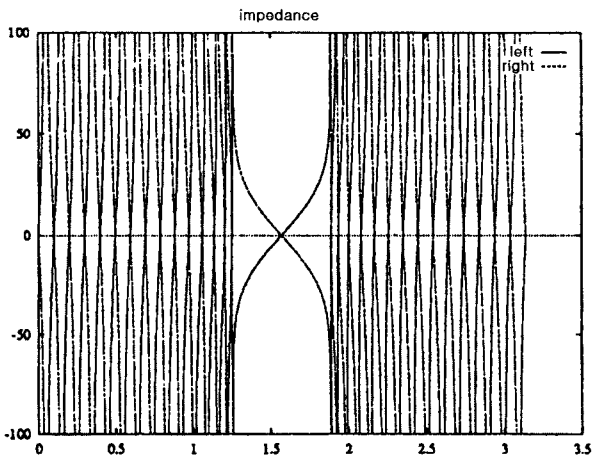


그림 6. 임피던스(교대로 접속한 경우).

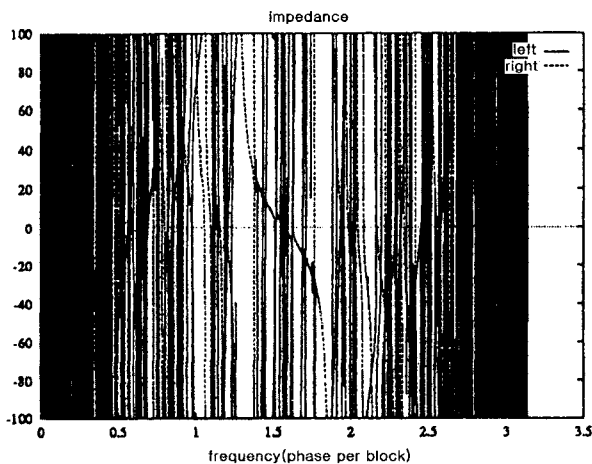


그림 7. 임피던스(랜덤선로).

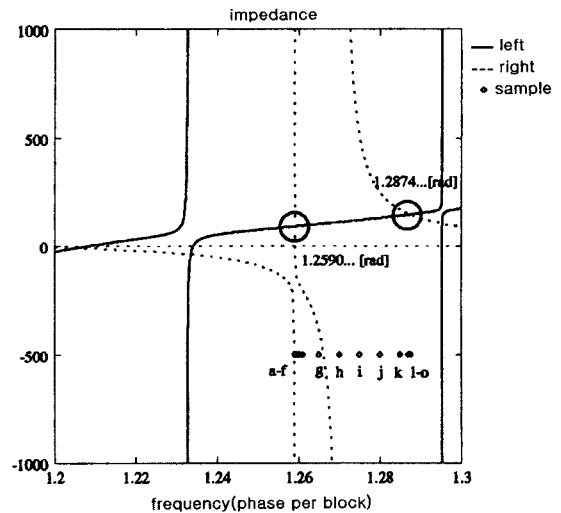


그림 8. 임피던스(0.60-0.65[rad]).

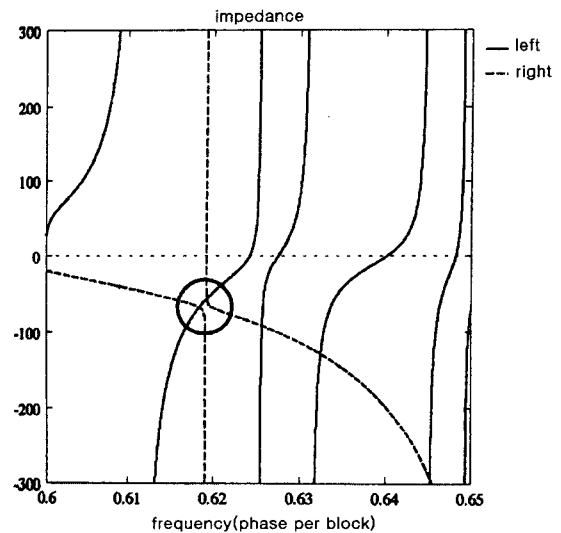


그림 9. 임피던스(1.2-1.3[rad]).

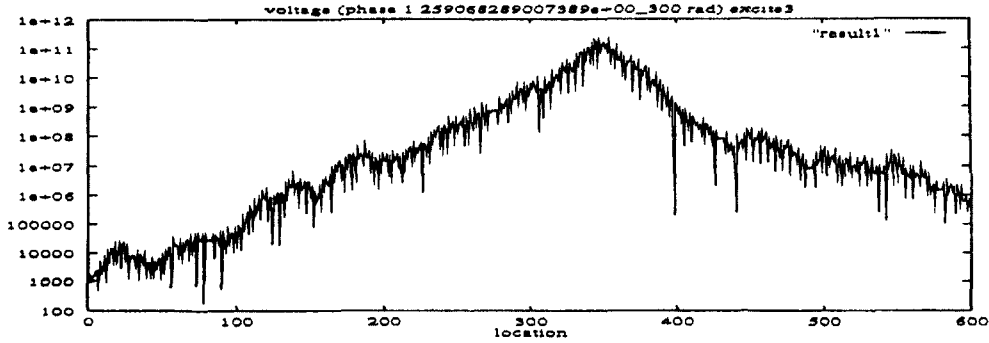


그림 10. 공진해 1.259068289e+00[rad].

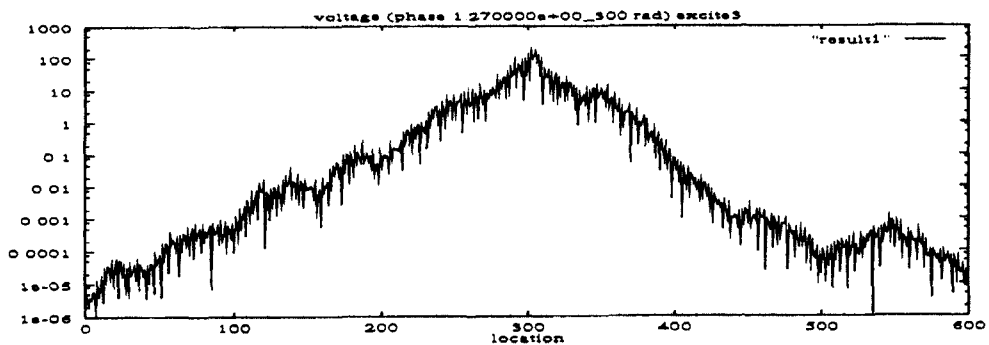


그림 11. 공진해 1.287464092831432e+00[rad].

5.2. 선로의 여진

랜덤한 선로상의 한 점, 또는 복수 개의 점에서 선로를 여진시킨 계산결과에 대해서 살펴보자. 공진해나 앞 절에서 본 국제현상과의 관계를 비교분석하기 위하여 앞 절에서 이용한 600개의 선로 블럭에 의한 랜덤 선로와 같은 모델을 사용하였다. 실제의 계산에서는 선로의 손실 설정방법으로 저항으로 중단하는 방법과 각 선로마다 감쇄정수를 설정하는 두 가지의 방법을 이용하였다.

(1) 중단의 정합을 취하고 손실을 설정

정합 중단하는 방법으로 손실을 설정하여, 다음과 같이 파라미터를 변화시켜 전압 파형을 해석하였다.

① 2절에서 구한 공진주파수 중 인접하는 2개를 적당히 취하고 그 사이에서 주파수를 변화시킨다. 여진하는 위치는 중앙에 고정시킨다.

② 선로 전체에 전류원을 삽입하여 여진시키고 주파수를 변화시킨다.

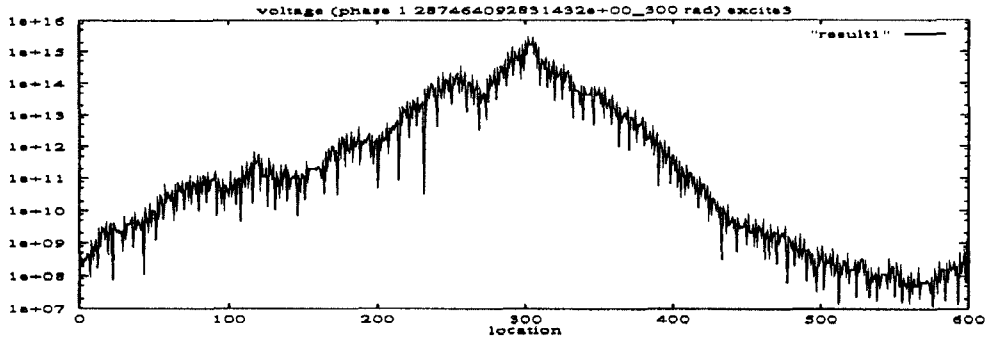
중앙에서 여진하여 주파수를 변화시킨 경우

5.1절에서 구한 공진주파수 중, $\theta=1.259068\cdots$ 과 $\theta=1.287464\cdots$ 를 선택하였다. 두 값 사이의 주파수를 적당히 15개를 취하여 중심에서 여진하였을 때의 전압 파형을 조사하였다. 이 중 편의상 공진주파수에 가까운 양 끝과 중간에서의 결과를 각각 그림 12의 (a), (k), (o)에 보였다. 각각의 그림의 제목에 나타난 괄호안의 문자는 그림 9에서의 알파벳 문자에 해당되며, 어느 주변의 주파수를 이용하였는가를 구별하기 위하여 표시하였다.

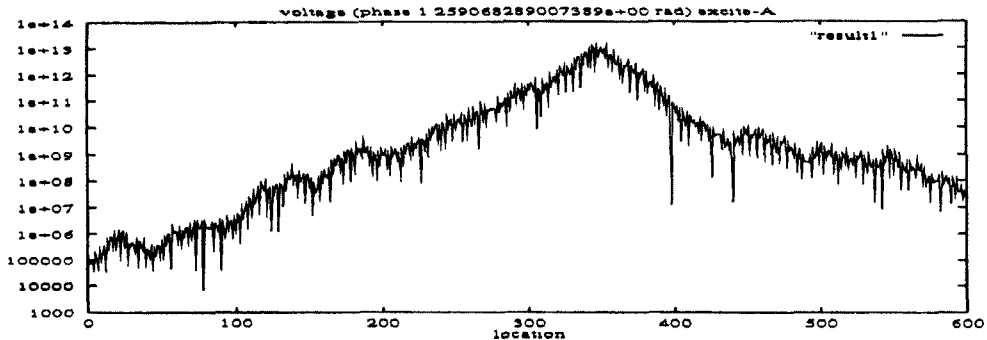
그림은 해의 진폭의 대수를 취한 값으로 나타냈다. 우선, 주목해야 될 것은 여진파형의 변화이다. 15개의 주파수로 여진시켰을 때 여진 주파수가 공진주파수에 접근함에 따라 해가 공진해에 가깝게 되는 모양을 확실히 알 수가 있다. 즉, 그림 12의(a)와 (k)는 그림 11과 똑 같은 모양이다. 그림은 해의 진폭의 대수를 취한 값으로 나타냈다. 공진주파수의 진폭은 상대적으로 최대 10^{12} 정도로 공진주파수에서 벗어난 다른 점의 값 10^4 에 비하여 현저하게 큰 진폭을 나타내는 것을 알 수 있다. 15개의 주파수를 여진하는 동안 공진주파수에 가까운 주파수로 여진하면 진폭은 현저히 줄어들지만 공진해의 형상에 아주 잘 닮은 파동이 얻어지는 것이 관측되었으며, 15개의 관측점 중 맨 중앙에 해당하는 그림 12(k)는 파형의 모양은 공진시와 비슷하지만 진폭값이 10^3 정도로 공진에서 벗어날수록 진폭이 현저하게 줄어드는 예상대로의 결과가 확인되었다.

선로 전체로 여진한 경우

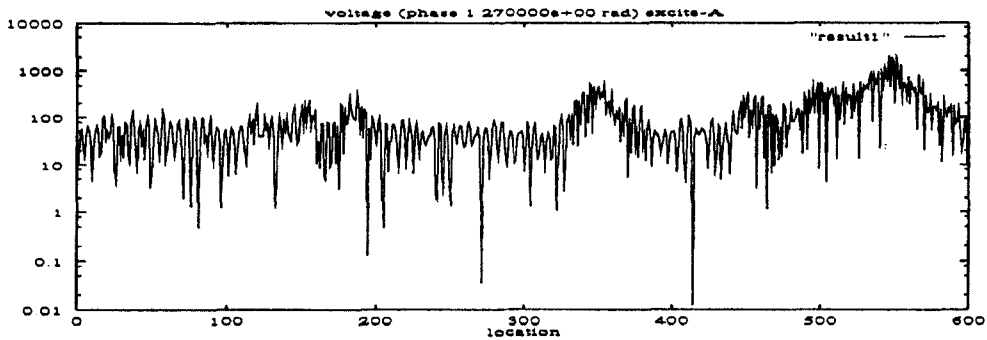
600개의 선로를 접속한 점 모두에 전류원을 삽입한 모델에 대하여 계산한 결과를 살펴보자. 앞 절에서 이 경우의 전압은 각각의 전류원으로 여진한 것의 중첩에 의해 얻어지는 것을 설명하였다. 또, 주파수에 대해서는 앞의 경우처럼 $\theta=1.259068\cdots$ 과 $q=1.287464\cdots$ 의 사이에서 15개점을 취하였다. 계산의 결과를 공진주파수에 가까운 양끝과 중간 그리고, 특이사항을 보이는 예를 그림 13의 (a), (h), (i), (k), (o)에 나타냈다. 그림 제목의 알파벳은 앞에서와 같이 그림 9의 문자에 해당한다. 공진주파수에 아주 가까운 것은 앞의 경우와 마찬가지로 거의 공진해와 같은 모양을 하고 있다. 그러나 그림 13의 (i), (h)



(a) 정합중단 중심여진(1.259068289007389e+00[rad])



(h) 정합중단 중심여진(1.270000e+00[rad])



(o) 정합중단 중심여진(1.287464092831432e+00[rad])

그림 12 정합중단 중심 여진의 경우(a, k, o는 그림 9의 알파벳 문자에 해당).

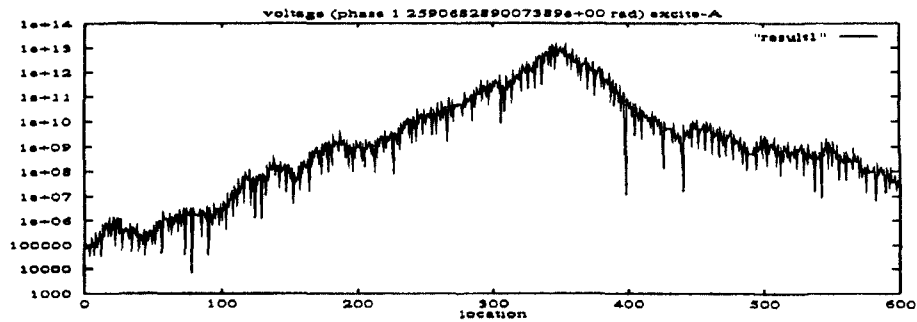
에 나타낸 중간 부분의 주파수에서는 공진시의 피크값 10^{14} 에서 10^3 으로 현저히 줄어들었으며 파형이 이글어져서 여러 곳에 작은 피크점이 보인다. 이것이 중심에서 여진한 경우와 큰 차이를 나타내는 점이다. 이것은 중심부근 이외에 피크를 가진 다른 모드를 여진했기 때문으로 생각된다. 그러나 이러한 경향은 공진주파수에서 멀리 떨어진 주파수를 이용하였을 경우로서 공진주파수 부근에서는 공진해에 가까운 파동이 지배적인 결과가 관측되었다.

(2) 각 선로에 손실을 설정한 경우

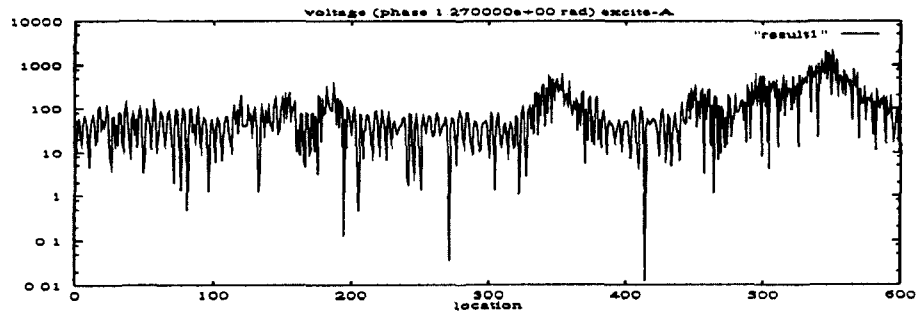
우선 손실의 크기를 100개의 선로에서 $1/e$ 이 되도록 설정하였다. 이 상태에서는 선로의 국소적인 성질이 크게 나타날 것으로 예상되어 선로 전체로서의 파형에 상당한 정도의 변화가 보일 것으로 생각된다. 그러므로 앞에서 계산한 모든 점에 전류원을 삽입한 것과 비교해 보기로 하자. 주파수의 정합을 취한 경우와 같은 방법으로 15개점을 선택하여 대표적인 3개의

여진 파형을 나타냈다. 주파수는 앞의 경우와 동일하게 하였다. 그림 13의 (a), (h), (o)에 해당하는 것이 그림 14의 (a), (h), (o)이다.

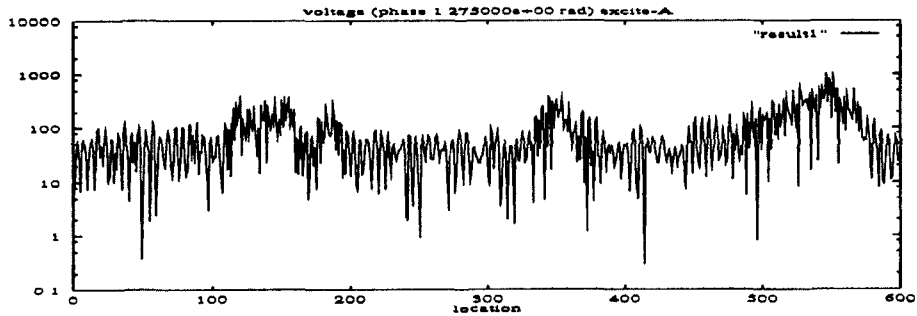
우선, 그림 13의 (a), (o)에 비해서 전압값이 10^{14} 정도에서 10^3 정도로 현저하게 작아진 것을 알 수 있다. 이것은 랜덤 선로의 감도가 아주 둔화된 것으로 예상된다. 그러나 선로에 손실이 없는 경우에 나타난 예리한 피크의 위치에 여기서도 아주 미소하지만 피크점이 존재한다. 전압이 집중하는 위치는 손실이 있어도 변화하지 않는다는 것을 나타내고 있다. 단, 피크가 아주 많이 감소하고 있는 것은 국제현상의 성질이 영향을 미치고 있기 때문으로 판단된다. 즉, 수많은 반사, 간섭을 반복하여 파동이 국제에 이르게 되지만, 선로를 거치면 거칠수록 감쇠하는 이번과 같은 설정에서는 피크의 위치, 즉 반사에 의해 통과하는 횟수가 가장 많은 위치에서 감쇠의 영향이 크게 나타난 것으로 생각된다.



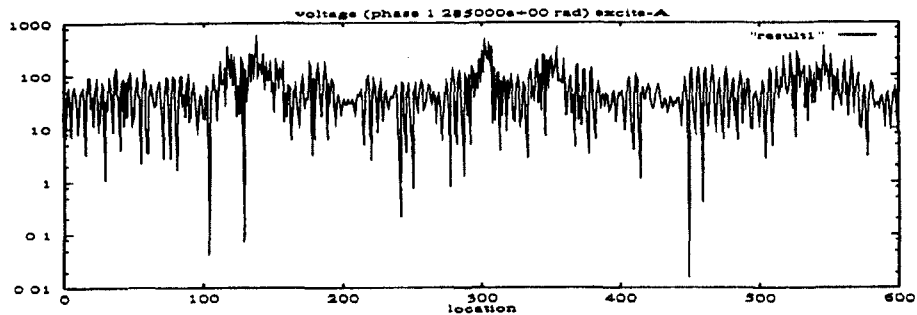
(a) 정합중단 전체여진(1.259068289007389e+00[rad])



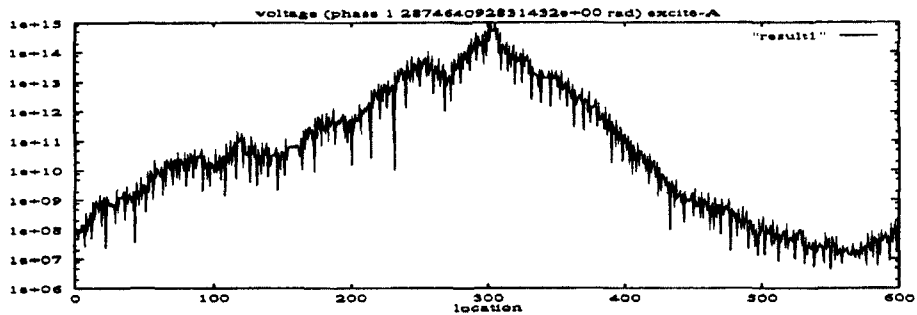
(h) 정합중단 전체여진(1.270000e+00[rad])



(i) 정합중단 전체여진(1.275000e+00[rad])

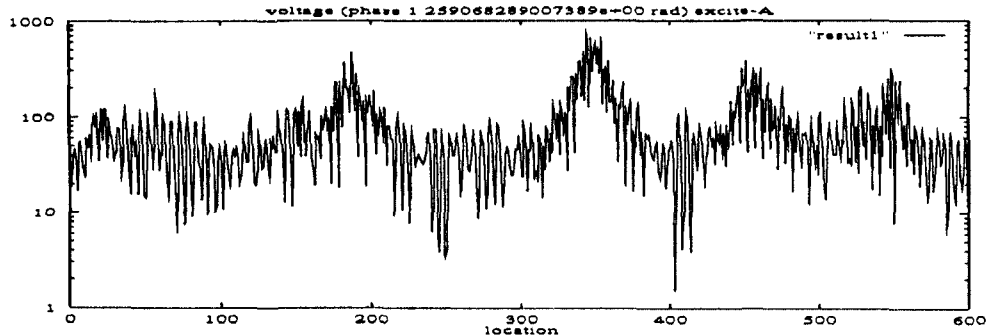


(k) 정합중단 전체여진(1.285000e+00[rad])

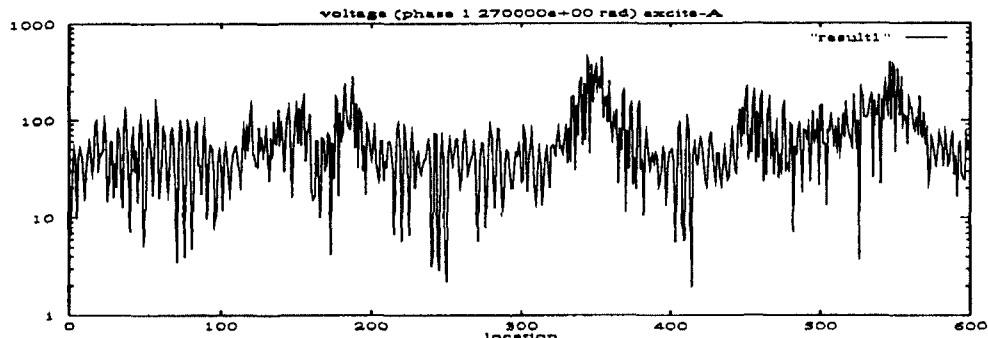


(o) 정합중단 전체여진(1.287464092831432e+00[rad])

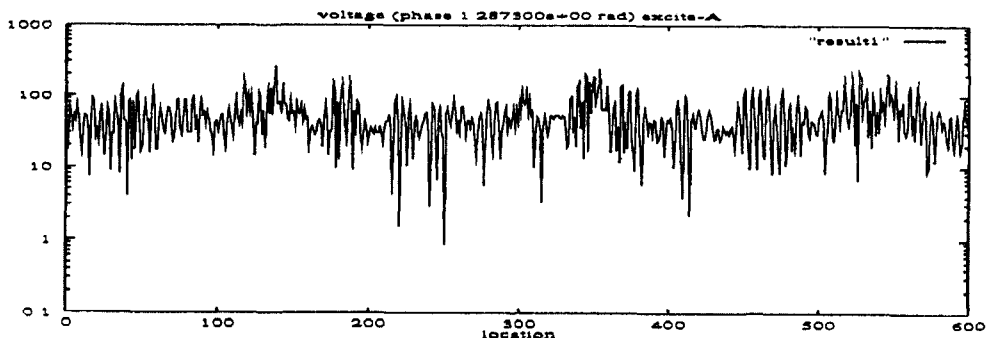
그림 13. 선로전체로 여진한 경우(a, h, i, k, o는 그림 9의 알파벳 문자에 해당).



(a) 일정손실 전체여진(1.259068289007389e+00[rad])



(h) 일정손실 전체여진(1.270000e+00[rad])



(o) 일정손실 전체여진(1.2787464092831432e+00[rad])

그림 14. 각 선로에 손실을 설정한 경우(a, k, o는 그림 9의 알파벳 문자에 해당).

VI. 결 론

랜덤 매질에 대한 해석을 특성임피던스가 랜덤하게 분포하는 전송선로로 표현하여, 선로의 공진조건을 임피던스를 이용하여 표현함으로써 랜덤 매질 내에서 광의 국재현상에 대하여 해석하였다.

수치해석을 실시한 결과, 랜덤 선로 중에는 국재하는 해가 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 전류원을 삽입하여 선로를 강제 여진시킨 경우에도 선로 상에서 전압파가 국재하는 것을 확인하였다. 선로 전체에 손실을 설정한 해석 결과에서 알 수 있는 것은 국재가 존재하는 위치의 파가 가장 큰 영향을 받는다는 사실에서 광의 국재는 파동이 반사를 반복하는 것에 의해 나타난다는 예상대로의 결과를 얻을 수 있었다.

수치해석의 모델에 4단자 회로의 블럭을 600개 접속하여 공진주파수를 구하는 데는 10자리 수 정도의 정밀도가 필요하여 바이너리 서치법을 이용하여 탐색하였다. 그러나 국재와 전

파정수의 조건과의 관계를 보다 더 정밀하게 조사하는 데는 더욱 큰 모델을 이용하거나 전파정수의 분포를 만드는 방법을 재검토할 필요가 있으며, 향후에서 이점에 대하여 중점적인 연구를 진행할 것이다.

참고문헌

- [1] T. Nakayama, K. Yakubo, and M. Takano, "Strong localization of photons in aperiodic waveguides : A numerical realization," *Phys. Rev. B*, vol. 47, no. 15, pp. 9449-9251. 1993.
- [2] N. Zekri, M. Schreiber, R. Ouasti, R. Bouamrane, and A. Brezini, "Nature of the electronic states in a chain of potential wells in presence of an electric field," *Z. Phys. B* 99, pp. 381-386, 1996.
- [3] J. G. rivas, R. Sprik, C. M. Soukoulis, K. Busch, and A. Lagendijk, "Optical Transmission through strong scattering and highly polydisperse Media," *Springer Link:Lecture*

- Notes in Physics 0547*, online publication, 2000.
- [4] H. Ogura, "Theory of waves in a homogeneous random medium," *Phys. Rev. A*, vol 11, no. 35, pp. 942-956, 1975.
- [5] M. Tominaga, "Anderson localization and optical fluctuation in the random media," *JJAP*, vol. 46, pp. 927-933, 1991.
- [6] A. Eilmers, R. A. Romer, and M. Schreiber, "The two-dimensional Anderson model of localization with random hopping," *Eur. Phys. J. B1*, pp. 29-38, 1998.
- [7] U. Sivan, A. Saar, "Light wave localization in dielectric waveguides," *Europhys. Lett.* vol. 5, no. 2, pp. 139-144, 1988.
- [8] A. Komiyama, "Mode waves in an off-diagonally disordered waveguide system," *IEICE Trans Electron*, vol. E83-C, no. 5, pp. 736-741, 2000.
- [9] 최영규, "랜덤 선로상의 광 국재현상에 관한 해석(1): 해의 국재성에 대한 이론적 고찰," 한국광학회지(2003, 10 게재 예정).
- [10] T. Ozawa, *Electric Circuit II*, (Schokabou, Japan) 1988.

Theoretical analysis of the lightwave localization phenomenon on the random transmission line (part 2) : simulation

Young-Kyu Choi[†]

Division of Photonics, Faculty of Engineering, Silla University, Busan 617-736, KOREA

[†]*E-mail: ykchoi@silla.ac.kr*

(Received March 13, 2003, Revised manuscript July 14, 2003)

Taking advantage of the probability function, we have analyzed the localization phenomenon of the solution of a propagating function under the condition that the propagation constants are randomly distributed. For example, we have investigated the localization phenomenon of the voltage wave for a transmission line in which the characteristic impedance is randomly distributed. We have confirmed that the localized solution is in existence on the random lossless transmission line. Even in the case that the voltage wave is impulsively excited by the current source, the voltage wave is localized. Because the light wave is seriously affected at the localized position in the lossy transmission line, we have determined that the light wave localization phenomena are generated by multi-reflection.

OCIS codes : 190.0190, 130.4310.