

도파관전송계에서의 유도형전자기파와 복사형 전자기파의 호상전환에 대한 연구

서상욱, 정원철

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학자, 기술자들은 당이 마련해준 과학기술룡마의 날개를 활짝 펴고 과학적재능과 열정을 총폭발시켜 누구나 다 높은 과학기술성과들을 내놓음으로써 부강조국건설에 이바지하는 참된 애국자가 되여야 합니다.》

맥스웰방정식으로부터 전자기파에 관한 식을 이끌어낼 때에는 전기마당과 자기마당이 시간적으로 빨리 변한다는것을 전제로 하고있다. 즉 맥스웰방정식을 풀어보면 변하는 전기마당벡터의 주변에는 그것을 휘감는 형태의 회리자기마당이 생기고 또 이때 생긴 변하는 자기마당벡터의 주변에는 그것을 휘감는 회리전기마당이 생긴다는 결론이 나온다. 이로부터 가속운동을 하는 전하 또는 시간적으로 변하는 전류가 있는 곳으로부터는 진동하는 전기마당과 자기마당이 서로 밀접한 연관속에서 공간으로 퍼져나간다는 결론이 나오는데 그것은 수학적으로도 쉽게 유도되며 그것을 바로 전자기파로 규정하고있다. 즉 지금까지는 시간적으로 변하는 전기마당과 자기마당의 합성으로 된 전자기마당이 빛속도를 가지고 공간적으로 퍼져나갈 때 그것을 전자기파로 보아왔다.[3]

그런데 전기마당과 자기마당은 물질의 한 형태이며 고유한 자체의 에너지를 가지고 있다. 따라서 전자기파는 물질이동의 한 형태이며 물체의 이동에서처럼 에너지를 운반한다는것을 알수 있다.

이로부터 전자기마당이 빛의 속도로 이동하면서 에너지를 나를 때 그것을 전자기파로 볼수 있다.

여기서 우리는 전자기마당을 보다 넓은 의미로 즉 정전기마당과 정자기마당까지 포함하는 포괄적인 개념으로 이해하기로 한다.

1. 전자기파의 두가지 형태

전류가 흐르는 선로주변에는 전류에 의한 자기마당과 두 선로사이의 전위차에 의해 생기는 전기마당이 동시에 존재하며 그 두 마당은 모든 점에서 서로 직교한다. 그것은 직류의 경우에도 같다.

평행2선선로의 경우에 이 마당에 의한 포인팅전력은 선로의 저항을 무시할 때

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) \cdot H(x, y) dx dy = U \cdot I$$

로, 동축선의 경우에는

$$P = \int_{r1}^{r2} \int_0^{2\pi} E(r, \varphi) H(r, \varphi) r dr d\varphi = U \cdot I$$

로 계산된다. 여기서 U 는 두 선로사이의 전위차이며 I 는 선로의 전류이다.

이것은 전기선로에 의한 에네르기수송이 선로주변의 마당(유도마당)에 의하여 실현된다는것을 의미하며 동축선을 비롯한 임의의 다른 형태의 전송선의 경우에도 마찬가지로 고찰할수 있다.

한편 에네르기의 이동이 물질의 이동과 밀접한 관계를 가진다는것을 고려할 때 전기 에네르기의 수송은 마당자체의 이동에 의하여 이루어진다고 보아야 한다. 즉 에네르기를 나르는 선로주변의 전자기마당은 그자체가 에네르기전달속도인 빛속도로 이동하는 상태에 있게 된다. 이것은 전자기파가 빛속도로 전파되면서 에네르기를 운반하는것과 매우 유사하다. 따라서 선로주변에 유기된 유도전자기마당은 일종의 전자기파로 볼수 있다. 이것을 안테나에서 복사되는 전자기파(복사마당전자기파)와 구별하여 유도형전자기파로 부를수 있다. 이 두 전자기파는 그자체가 빛속도로 이동하면서 에네르기를 운반한다는 점에서는 똑같으며 원천과의 관계에서 약간의 차이가 있을뿐이다. 즉 유도형전자기파는 마당과 원천(선로)사이 에 부단한 에네르기교환이 일어나는 상태에서 전파되지만 복사형전자기파는 일단 복사된 후에 원천(안테나)과의 에네르기교환이 더는 일어나지 않는다.

선로주변의 유도마당을 전자기파로 보려면 전자기파에 대한 정의를 앞에서 한것처럼 새롭게 주어야 한다.

2. 유도형전자기파에 의한 선로의 정합조건

유도형전자기파에 대한 개념을 리용하면 직류 및 교류회로에서의 정합조건에 대하여 보다 구체적으로 밝힐수 있다.

지금까지는 직류나 공업용교류선로에서의 정합조건은 원천(전원)으로부터 부하로 에네르기전달이 가장 잘되는 조건으로서 원천의 내부저항 $R_{\text{원}}$ 과 부하저항 $R_{\text{부}}$ 가 서로 같으면 만족되는것으로 보아왔다.

그러나 비록 $R_{\text{원}}$ 과 $R_{\text{부}}$ 의 값이 서로 같다고 하더라도 그 값이 매우 크거나 매우 작으면 에네르기전달이 잘 일어나지 못하며 그 값이 0이거나 무한대이면 에네르기가 전혀 전달되지 못한다. 에네르기전달이 효과적으로 일어나려면 $R_{\text{원}}$ 과 $R_{\text{부}}$ 들이 서로 같을뿐만 아니라 그 값이 어떤 일정한 값으로 되여야 한다.

$R_{\text{원}}$ 과 $R_{\text{부}}$ 값들이 크면 전류는 작아지고 전위가 커지므로 유도마당에서는 자기마당의 몫이 작아지고 반대로 전기마당의 몫이 커진다. 반대로 $R_{\text{원}}$, $R_{\text{부}}$ 들이 작아지면 전류는 커지고 전위가 낮아지므로 자기마당이 세지고 전기마당은 약해진다. 그러므로 전기마당과 자기마당이 갈아지는 경우 즉 유도마당에서 전기마당의 에네르기와 자기마당의 에네르기가 갈아지게 하는 $R_{\text{원}}$, $R_{\text{부}}$ 값이 존재하는데 바로 이것을 정합조건으로 규정할수 있다.

사실 선로주변에 형성된 마당전체가 $c=1/\sqrt{\epsilon\mu}$ 의 빛속도로 이동한다고 보고 계산한 전력값은 앞에서 계산한 포인팅전력보다 크며 오직 전기마당에네르기와 자기마당에네르기가 같은 경우에만 포인팅전력과 일치한다. 즉 포인팅전력과 마당흐름으로 계산한 전력이 같다

고 놓은 등식은 평행2선선로의 경우에

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) H(x, y) dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\varepsilon E^2(x, y)}{2} + \frac{\mu H^2(x, y)}{2} \right) \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} dx dy$$

로 되고 동축선의 경우에는

$$\int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} E(r, \varphi) H(r, \varphi) r dr d\varphi = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\varepsilon E^2(r\varphi)}{2} + \frac{\mu H^2(r\varphi)}{2} \right) \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} r dr d\varphi$$

로 되는데 이 등식들은 각각

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\varepsilon E^2(x, y)}{2} dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\mu H^2(x, y)}{2} dx dy$$

및

$$\int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \frac{\varepsilon E^2(r\varphi)}{2} r dr d\varphi = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \frac{\mu H^2(r\varphi)}{2} r dr d\varphi$$

인 경우에만 성립한다. 이것은 선로주변에 형성된 마당전체가 $c=1/\sqrt{\varepsilon \mu}$ 의 속도로 이동한 결과로 에네르기가 전달되는 조건을 정합조건으로 규정할수 있다는것을 의미하는데 이 조건은 평행2선선로와 동축선의 경우 $R_{\text{원}}, R_{\text{부}}$ 들이 선로의 파동저항과 같을 때 성립한다.

정합조건이 맞지 않는 경우에는 선로주변의 전기마당에네르기와 자기마당에네르기가 같지 않으며 어느 한쪽이 더 크게 된다. 레컨대 전기마당에네르기가 더 크다면 전기마당에네르기중에서 자기마당에네르기만 한 몫만이 자기마당과 함께 빛속도로 이동하고 나머지 몫(전기마당에네르기에서 자기마당에네르기를 뺀 값)은 이동하지 않고 멎어있는것으로 보아야 한다.

극단한 경우 개방선로($R_{\text{원}}, R_{\text{부}}$ 들이 무한대)주변에는 전기마당만 존재하고 단락선로($R_{\text{원}}, R_{\text{부}}$ 들이 0)주변에는 자기마당만 존재한다. 이때에는 포인팅전력이 0이며 마당은 정지한 마당이다.

선로주변의 유도성전자기파는 직류의 경우에도 똑같이 논의된다. 즉 이때의 직류자기마당과 정전기마당도 $c=1/\sqrt{\varepsilon \mu}$ 의 속도로 이동하면서 에네르기를 운반한다. 그러므로 이것은 전자기파의 부류에 속한다. 이로부터 우리는 시간적으로 변하지 않는 E 와 H 로 이루어지는 전자기파 즉 정적전자기파가 존재한다는 결론을 짓게 된다. 물론 이것은 복사형전자기파와는 구별되며 유도형전자기파의 부류에 속하는 특수한 전자기파이다.

3. 도파관전송계에서 유도형전자기파와 복사형전자기파의 호상관계

자유공간으로 전파되는 전자기파는 복사형전자기파이지만 도파관과 같은 립체회로를 통하여 전파되는 전자기파는 유도형전자기파이다. 그것은 립체회로의 초고주파전류와 전자기마당사이에서 전파과정에 부단한 에네르기교환이 일어나기때문이다. 그러나 립체회로의 기하학적크기가(실례로 도파관자름면) 매우 커지면 그 내부의 전자기마당은 점차 자유공간에서의 복사마당과 비슷해진다.

구체적인 실례로 도파관내부마당의 마당성분들에 대한 식을 보면 직각도파관의 파형인 TM_{mn} 파인 경우[1, 2]

$$\begin{aligned} E_X &= -j \frac{\beta \cdot k_X}{k_C^2} E_Z \cos k_X x \sin k_Y y \\ E_Y &= -j \frac{\beta \cdot k_Y}{k_C^2} E_Z \sin k_X x \cos k_Y y \\ E_Z &= E_Z \sin k_X x \sin k_Y y \\ H_X &= j \frac{\omega \varepsilon \cdot k_Y}{k_C^2} E_Z \sin k_X x \cos k_Y y \\ H_Y &= -j \frac{\omega \varepsilon \cdot k_X}{k_C^2} E_Z \cos k_X x \sin k_Y y \end{aligned}$$

의 모양을 가진다. 여기서

$$k_X = m\pi/a, \quad k_Y = n\pi/b$$

이며

$$k_C = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

는 림계파수이다. 그리고 a 와 b 는 직각도파관의 규격을 표시하며 m, n 은 파형의 모드수를 표시하는 옹근수이다.

m, n 값이 주어진 경우 도파관벽으로부터 멀리 떨어진 점에서의 마당세기는 도파관규격 a, b 가 매우 클 때 림계파수가 매우 작아지므로 위의 공식들에서 보는바와 같이 세로방향마당성분 즉 Z 성분의 크기는 가로성분 즉 X 및 Y 성분에 비하여 매우 작아진다. 이것은 세로성분이 없고 가로성분만 존재하는 파(자유공간에서 전파되는 전자기파)의 모양에 접근한다는것을 의미하는데 이것은 전자기파의 전파과정에 도파관의 중심부분마당에서는 도파관금속표면의 초고주파전류와 마당사이의 에네르기교환이 거의 일어나지 않게 되는것과 관련된다. 이로부터 우리는 주어진 전자기파가 유도형전자기파인가 아니면 복사형전자기파인가 하는것은 전송회로의 전류와 마당사이의 에네르기교환이 있는가 없는가에 따라 결정되며 그런 에네르기교환이 점차 약화되는데 따라 유도형전자기파가 복사형전자기파로 넘어간다는것을 알수 있다. 이런 경우에는 그 두 전자기파의 명확한 한계를 그을수 없다는것이 명백하다.

이와는 반대로 도파관의 규격을 무한히 큰 값으로부터 점차 감소시키면 그 내부의 전자기파는 복사형으로부터 유도형으로 넘어간다.

맺 는 말

선로주변의 전자기마당이 에네르기를 운반하는 매체로 된다는 사실로부터 전자기파에 대한 새로운 정의를 주고 전자기파를 복사형전자기파와 유도형전자기파로 구분하였다. 그리고 유도형전자기파에 대한 개념을 리용하여 공업용교류선로 및 직류선로들에서의 정합조건을 새롭게 평가하였다. 또한 전송회로와 전자기파의 에네르기교환정도를 유도형전자기파와 복사형전자기파로 전자기파를 구분하는 척도로 제기하고 유도형전자기파와 복사형전자기파의 호상전환과정을 해명하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), **48**, 11, 57, 주체91(2002).
- [2] 서상욱; 초고주파전자학, 김일성종합대학출판사, 95~102, 주체96(2007).
- [3] M. Serhir et al.; IEEE Trans. AP, **56**, 1, 48, 2008.

주체105(2016)년 9월 5일 원고접수

Mutual Conversion of Inductive Electromagnetic Wave and Radiating Electromagnetic Wave in Waveguide Transmission System

So Sang Uk, Jong Won Chol

We grouped electromagnetic wave into radiating and inductive type, and evaluated matching condition in transmission line.

Key word: inductive electromagnetic wave