

## High-frequency Current Distribution Control

林 漢 尙\* · 朴 宰 弘\*\*  
(Hansang Lim · Jaehong Park)

**Abstract** - In this paper, it is shown that high frequency current can be controlled to concentrate near the desired path in a conducting plate. A conducting plate is modelled to examine current distribution. And current distribution is analyzed in view of the frequency and geometric characteristics of current path. The high frequency current behavior from the analysis is compared with the experiments. The results, obtained by the experiments of test specimens, are in good agreement with the analytical results.

**Key Words** : high-frequency current behavior, current distribution control

### 1. 서 론

도체에 전압을 인가하였을 때 도체에서의 전류의 분포가 주파수에 따라 변한다는 사실은 널리 알려져 있다. 도체에서 주파수에 따른 전류의 분포를 설명하는 대표적인 것이 skin effect로 이는 주파수가 증가하면 전류가 도체 단면에 균일하게 퍼져 흐르지 않고 도체 표면으로 몰려 흐르는 현상이다[1],[2],[3]. 그리고, 주파수가 증가할수록 전류는 인덕턴스 성분이 작은 경로로 흐르려 하는 특성을 가지고 있다 [4].

본 논문에서는 이와 같은 주파수에 따른 전류 분포 변화를 이용하여 고주파 전류가 도체에서 원하는 경로를 따라 흐르도록 유도할 수 있음을 보인다. 먼저 도체에서의 전류 경로를 모델링하고 이 모델에서 주파수에 따른 전류 분포의 변화를 분석하여 고주파 전류의 특성을 살펴본다. 그리고 고주파 전류의 특성을 이용하여 전류가 원하는 경로로 흐르도록 유도할 수 있음을 실험을 통하여 확인한다.

전압이 인가된 도체에는 많은 전류 경로가 형성되며 각 전류 경로들은 그 경로를 대표하는 임피던스들의 연결로 모델링할 수 있다. 각 경로에 흐르는 전류의 크기는 그 경로의 임피던스에 반비례하며 임피던스의 크기는 주파수와 그 전류 경로의 형태에 의해 결정되므로 이로부터 주파수에 따른 전류의 분포를 분석한다. 특히 고주파의 경우 임피던스에서 인덕턴스의 영향이 증가하므로 고주파 전류는 인덕턴스 성분이 작은 경로로 흐르게 된다. 그런데 전류 경로의 인덕턴스 성분은 그 경로가 형성하는 루프 면적에 의존하므

로 이런 성질을 이용하여 전류가 원하는 경로로 흐르도록 유도할 수 있다. 그리고 실험을 통하여 이와 같은 전류의 수평적 분포의 변화와 고주파에서의 경로 유도 특성을 확인한다.

본 논문은 전류 경로의 이론적 분석과 실험 및 결과 분석으로 구성되어 있다. 2장 전류 분포의 이론적 분석에서는 도체에서 전류의 수평적 분포를 분석하여 전류의 경로 유도 특성을 살펴 보고 3장 실험 및 결과 분석에서는 주파수에 따른 전류 분포 실험을 통하여 2장의 분석 결과와 비교, 확인한다.

### 2. 전류 분포의 이론적 분석

이 장에서는 도체를 모델링하여 전류의 수평적 분포를 분석하고 이로부터 전류가 원하는 경로로 흐르도록 유도할 수 있음을 알아 본다.

#### 2.1 도체의 모델링

그림 1은 전압이 인가된 도체에서 형성되는 전기장  $\vec{E}$ 를 나타낸 것이다.

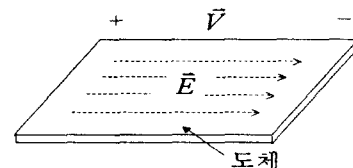


그림 1 도체에서의 전기장  $\vec{E}$

Fig. 1 Electric field  $\vec{E}$  in a conductor

도체에 전압  $V$ 가 인가되면 도체에는 그림 1과 같이 전기장  $\vec{E}$ 가 형성되고 전류 밀도  $\vec{j}$ 와 전기장  $\vec{E}$ 사이에는

\* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程

\*\* 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 1998年 8月 28日

最終完了 : 1999年 5月 20日

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (1)$$

의 관계가 있으므로 전기장을 따라 많은 전류 경로가 형성된다. 단,  $\sigma$ 는 전도율이다.

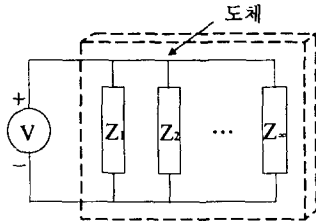


그림 2 도체에서의 전류 경로 모델링  
Fig. 2 Current path modeling in a conductor

이처럼 도체에서의 전류는 여러 경로를 따라 흐르고 이때 각 전류 경로는 그 경로의 기하학적 형태<sup>1)</sup>에 의해 결정되는 임피던스로 나타낼 수 있다. 그리고 각 경로마다 인가된 전압  $V$ 가 일정하므로 각 전류 경로들은 병렬 연결된 형태이다. 따라서 입력전압  $V$ 에 대하여 도체는 형성된 전류 경로를 대표하는  $N$ 개의 임피던스들의 병렬연결로 모델링할 수 있으며 이는 그림 2와 같다. 이렇게 병렬 연결되어 있는 각 임피던스들에 흐르는 전류는 Ohm's law<sup>2)</sup>에 따라 임피던스들의 크기에 반비례하므로  $k$ 번째 전류경로인  $Z_k$ 에 흐르는 전류를  $i_k$ 라고 하면

$$i_k = \frac{V}{Z_k} \quad (2)$$

가 된다.

그리고 전류 경로에서의 저항 성분을  $R_k$ , 인덕턴스 성분을  $L_k$ , 커패시턴스 성분을  $C_k$ 라고 하면 주파수  $\omega$ 에서의 임피던스  $Z_k$ 는

$$Z_k = R_k + j(\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k}) \quad (3)$$

이다. 그런데 도체내에서는 커패시턴스 성분  $C_k$ 가 존재하지 않으므로 도체에서의 전류 경로를 대표하는 임피던스는

$$Z_k = R_k + j\omega L_k \quad (4)$$

로 나타내어진다.

### 2.2 주파수에 따른 전류의 수평적 분포 분석

이와 같은 도체의 모델에서 주파수에 따라 각 경로의 전류의 분포를 살펴 본다. 전압  $V$ 에  $N$ 개의 임피던스  $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ 가 병렬 연결되어 있을 때 식 (2), (4)로부터  $k$ 번째 임피던스에 흐르는 전류의 크기는

$$|I_k| = \frac{|V|}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}} \quad (5)$$

이 된다[5, 6].

$R_k \gg \omega L_k$ 인 경우, 즉  $\omega \ll \frac{R_k}{L_k}$ 인 주파수 영역에서는

$$|Z_k| \approx R_k \quad (6)$$

가 되고 전체 전류에 대해  $k$ 번째 임피던스에 흐르는 전류 비는

$$\frac{|I_k|}{\sum_{k=1}^N |I_k|} \approx \frac{\frac{1}{R_k}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k}} \quad (7)$$

로 전류비가 주파수와 무관하게 저항비에 의해서만 결정된다. 그리고  $R_k \ll \omega L_k$ 인 경우, 즉  $\omega \gg \frac{R_k}{L_k}$ 인 주파수 영역에서는

$$|Z_k| \approx \omega L_k \quad (8)$$

가 되고 전류 비는

$$\begin{aligned} \frac{|I_k|}{\sum_{k=1}^N |I_k|} &\approx \frac{\frac{1}{\omega L_k}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{\omega L_k}} \\ &= \frac{1}{L_k} \end{aligned} \quad (9)$$

로 전류비가 주파수와 무관하게 인덕턴스비에 의해서만 결정된다. 그러나  $\omega \sim \frac{R_k}{L_k}$ 인 주파수 영역에서  $k$ 번째 임피던스에 흐르는 전류 비는

$$\frac{|I_k|}{\sum_{k=1}^N |I_k|} \approx \frac{\frac{1}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{\sqrt{R_k^2 + (\omega L_k)^2}}} \quad (10)$$

가 되어 주파수에 따라 전류 분포가 변함을 알 수 있다.

### 2.3 고주파 전류의 경로 유도

식 (4)에서 전류 각 경로의  $R_k, L_k$ 는 전류 경로의 길이  $l_k$ , 경로에 의해 형성되는 전류의 루프 면적  $S_k$ 에 대하여

$$R_k = \rho \frac{l_k}{A} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} L_k &= \frac{d}{dl} \int_{S_k} \vec{B} \cdot \vec{ds} \\ &= \frac{d}{dl} \int_{S_k} \nabla \times \left( \frac{\mu}{4\pi} \int_C \vec{I} \frac{e^{-j\beta r}}{r} dl \right) \cdot \vec{ds} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{단, } \beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon}$$

로 나타내므로[1, 2, 3] 각 전류 경로의 임피던스는 경로의 길이, 형성되는 루프 면적과 같은 기하학적 형태에 의해 결정된다.<sup>3)</sup> 이 식에서 루프 면적은 전류의 경로에 의해 둘러싸인 면적이다. 그러므로 저항 성분은 경로의 길이에, 인덕턴스 성분은 경로에 의해 형성되는 루프 면적과 양의 상관

3) 식에서  $\rho$ 는 고유 저항,  $A$ 는 전류경로의 단면적,  $I$ 는 전류의 크기,  $B$ 는 자속 밀도,  $\mu$ 는 투자율,  $\epsilon$ 은 유전율,  $\omega$ 는 각속도,  $C$ 는 루프를 형성하는 경로의 길이,  $R$ 은 전류소스로부터의 거리이다.

1) 경로의 길이, 모양, 루프 면적 등  
2)  $V=ZI$ , 단  $V$ 는 전압,  $Z$ 는 임피던스,  $I$ 는 전류

관계가 있는데 특히 균일한 자기장(homogeneous magnetic field)의 경우

$$L_k = \frac{d}{dl} B \cdot S_k \quad (13)$$

로 인덕턴스가 루프 면적에 정비례하게 된다.

그런데 주파수가 증가하면 인덕턴스에 의한 리액턴스  $\omega L$ 이 임피던스의 주된 성분이 되고 전류 루프의 면적과 인덕턴스의 상관 관계에 의해 고주파에서는 루프 면적을 작게 형성하는 경로로 전류가 몰려 흐르게 된다. 이와 같은 고주파 전류의 성질을 도체에서의 전류의 흐름에 적용하면 전류의 흐름을 조절할 수 있다. 도체에 전류를 인가하는 신호선을 도체판위에 위치시킬 때 인가된 전류는 도체판을 통해 되돌아 흐른다. 이 때 고주파 전류를 인가하면 전류는 신호선과 형성되는 루프 면적이 가장 작은 경로를 따라 몰려 흐르게 되고 따라서 전류는 신호선 바로 아래로 몰려 흐르게 된다. 그러므로 전류를 인가하는 신호선의 형태와 위치, 주파수를 조절함으로써 전류의 주된 경로를 원하는 경로로 조절하고 그 분포를 좁은 범위로 제한할 수 있다. 즉, 신호선을 원하는 경로의 형태로 위치시킴으로써 전류가 원하는 경로로 몰려 흐르도록 유도할 수 있다.

### 3. 실험 및 결과 분석

이 장에서는 실험을 통하여 주파수에 따른 전류 분포의 변화를 확인하고 이를 2장의 이론적 분석 결과와 비교하여 고주파 전류의 경로를 유도할 수 있음을 보인다.

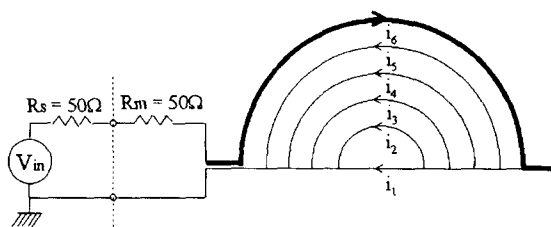


그림 3 실험물 I  
Fig. 3 Test specimen I

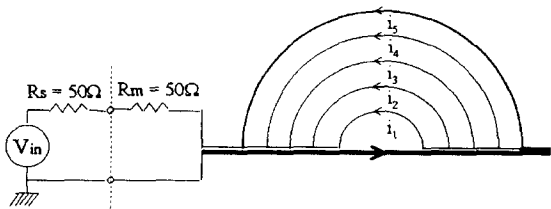


그림 4 실험물 II  
Fig. 4 Test specimen II

실험물 그림 3, 4는 도체판에서 주파수에 따른 전류의 분포 변화를 알아보기 위한 실험물이다. 그림에서 가는 선들은 도체판을 모델링한 것으로 전류 경로의 길이와 전류 루프가 형성하는 면적이 각기 다른 도선들의 양 끝을 연결

하여 각 도선에 해당하는 임피던스들이 병렬 연결된 형태이다. 굵은 선은 도체에 전압을 인가하는 신호선으로 주파수가 증가함에 따라 굵은 선의 형태를 조절함으로써 되돌아오는 전류의 경로를 유도할 수 있음을 보인다.

인가된 전압에 의한 전류는 화살표 방향을 따라 굵은 선으로 흘러 들어갔다가 여러개의 가는 선을 통하여 흘러 나온다. 그림 3, 4에서 여러 개의 가는 선들은 도체에서 서로 다른 임피던스들을 가진 전류의 경로를 나타낸 것이므로 실험물에서 전류 루프의 면적은 굵은 선과 가는 선에 의해 형성되는 면적이고 각 경로의 임피던스는 굵은 선과의 기하학적 형태에 의하여 결정된다.

그림 3에서 되돌아 오는 전류 경로는 직선 및 반지름이 각각 2, 3, 4, 5, 6(cm)인 반원으로 이루어져 있는데 차례대로 각 경로를 1번, 2번, 3번, 4번, 5번, 6번이라고 한다. 또, 그림 4에서 되돌아 오는 전류 경로는 반지름이 각각 2, 3, 4, 5, 6(cm)인 반원으로 역시 차례대로 각 경로를 1번, 2번, 3번, 4번, 5번이라고 한다. 그리고  $V_{in}$ 은 전압원으로, 원하는 주파수의 정현파 전압을 발생시키며  $R_s = 50\Omega$ 의 출력 임피던스를 가지고 있다. 실험물의  $R_m = 50\Omega$  저항은 전압원과의 임피던스를 일치시키고 주파수가 변하여도 전체 임피던스의 크기를 유지함으로써 전체 전류의 크기를 일정하게 유지하기 위한 것이다. 그림으로써 전류의 크기가 일정한 조건에서 주파수에 따른 전류 분포의 변화만을 파악할 수 있다.

그림 3의 실험물 I에서 전류 경로의 길이가 길어질수록 형성하는 전류 루프의 면적은 작아지는 반면 그림 4의 실험물 II에서는 전류 경로의 길이가 증가하면 전류 루프의 면적도 증가한다. 그러므로 실험물 I에서 각 경로의 임피던스를 보면 저항 성분은  $R_1 < R_2 < R_3 < R_4 < R_5 < R_6$ 이 되고 인덕턴스 성분은  $L_1 > L_2 > L_3 > L_4 > L_5 > L_6$ 이 된다. 또한 실험물 II에서 각 경로의 저항 성분은  $R_1 < R_2 < R_3 < R_4 < R_5$ 이 되고 인덕턴스 성분은  $L_1 < L_2 < L_3 < L_4 < L_5$ 이 된다.

이와 같이 서로 다른 특성을 가진 실험물 I, II에서 주파수를 변화시키면서 각 도선의 전류를 측정하고 주파수에 따른 전류의 분포 특성을 파악하여 전류 경로의 길이와 전류 루프의 면적이 전류의 분포에 주는 영향을 살펴본다. 즉, 주파수가 증가하면  $L$ 이 작은, 즉 루프 면적이 작은 경로가 주된 경로가 될 것이라는 2장의 분석 결과와 비교, 확인하고 이를 이용하여 고주파 전류의 경로를 유도할 수 있음을 보인다.

#### 3.1 인덕턴스 해석

식 (12)를 이용하여 실험물에서의 인덕턴스 성분을 이론적으로 해석한다. 실험물 II에서의 인덕턴스를 해석하면 이를 이용하여 실험물 I의 인덕턴스를 해석할 수 있으므로 실험물 II의 인덕턴스를 계산한다.

실험물 II에서 전류 루프는 그림 5의 굵은 선과 같이  $-x$  방향의 직선 전류와 반시계 방향  $B$ 의 전류에 의해 형성된다. 루프 면적내에서는 자기 밀도가 균일하다고 가정하고 원점에서의 자기 밀도를 계산하여 이  $B$ 와 식 (12)로부터 인덕턴스 크기를 계산한다. 전류 루프의 반지름을  $a$ 라고 한다.

3.1.1 직선 전류에 의한 자기 밀도

전류밀도  $\vec{J}_e$ 가 conduction 전류만으로 형성되었다고 하면 전류밀도  $J_e$ 는  $x$ 축을 따라 나아가므로 세 방향 성분 중

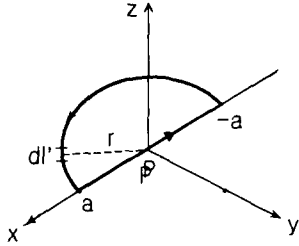


그림 5 실험물 II에서의 전류 루프  
Fig. 5 Current loop in test specimen II

오직  $x$ 방향성분인  $J_x$ 만이 존재하게 된다. 따라서

$$\nabla^2 A_x + \beta^2 A_x = -\mu J_x \quad (14)$$

을 만족하고 이 식은  $(x', 0, 0)$ 에 있는 전류 source  $I_x(x', 0, 0)$ 에 대해서

$$A_x = \frac{\mu}{4\pi} \int_C I_x(x', 0, 0) \frac{e^{-j\beta R}}{R} dl' \quad (15)$$

와 같은 해를 가진다.<sup>4)</sup> 단,

$$\vec{I}_e = \vec{a}_x I_x \quad (16)$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + y^2 + z^2} \quad (17)$$

$$dl' = dx' \quad (18)$$

이다.

전달에 의한 지연 영향을 무시하여 전기적 동작들이 동시에 일어난다고 하면<sup>5)</sup>  $a$ 에서  $-a$ 까지  $x$ 축을 따라 흐르는 전류( $I_x(x', 0, 0)$ )가 위치( $x'$ )에 상관없이 일정하다고 볼 수 있다. 그러므로

$$|I_x(x', 0, 0)| = I \quad (19)$$

이 되고 직선 전류에 의한 vector magnetic potential  $A_x$ 는

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{\mu}{4\pi} \int_{-a}^a -|I_x(x', 0, 0)| \frac{e^{-j\beta\sqrt{(x-x')^2 + y^2 + z^2}}}{\sqrt{(x-x')^2 + y^2 + z^2}} dx' \\ &= \frac{\mu I}{4\pi} \int_{-a}^a -\frac{e^{-j\beta\sqrt{(x-x')^2 + y^2 + z^2}}}{\sqrt{(x-x')^2 + y^2 + z^2}} dx' \end{aligned} \quad (20)$$

이 된다.

식 (20)를 이용하여 자기밀도를 구하면

$$\begin{aligned} \vec{B}_1 &= a_y \frac{\partial}{\partial z} A_x + a_z \left( -\frac{\partial}{\partial y} A_x \right) \Big|_{x=0, y=0, z=0} \\ &= a_y \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\mu I}{4\pi} \int_{-a}^a -\frac{e^{-j\beta\sqrt{x'^2 + z^2}}}{\sqrt{x'^2 + z^2}} dx' \right] \Big|_{z=0} \end{aligned} \quad (21)$$

이 된다.

4)  $A$ 는 vector magnetic potential로  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ 의 관계가 있다.

5) lumped-parameter system

3.1.2 반시계 방향 전류에 의한 자기 밀도

그림 6은 전류의  $\phi$ 방향의 성분을  $x, y$  방향성분으로 나누어 나타낸 것이고 이 관계를 수식으로 표현한 것이 식 (22)이다.

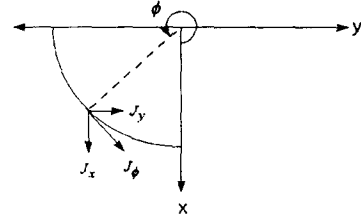


그림 6  $J_\phi$ 와  $J_x, J_y$ 의 관계

Fig 6 Conversion to Cartesian coordinate

$$\begin{aligned} J_x &= |J_\phi| \sin(2\pi - \phi') = -|J_\phi| \sin(\phi') \\ J_y &= |J_\phi| \cos(2\pi - \phi') = |J_\phi| \cos(\phi') \end{aligned} \quad (22)$$

$$\vec{I}_e = \vec{a}_\phi I_\phi \quad (23)$$

$$dl' = ad\phi' \quad (24)$$

이 식들로부터  $A_x$ 와  $A_y$ 를 구하면

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{\mu}{4\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -|I_\phi(a, \phi', 0)| \sin(\phi') \\ &\quad \times \frac{e^{-j\beta\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}}}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} ad\phi' \\ &= \frac{\mu Ia}{4\pi} \int_{\pi}^{2\pi} -\sin(\phi') \\ &\quad \times \frac{e^{-j\beta\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}}}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} d\phi' \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} A_y &= \frac{\mu}{4\pi} \int_{\pi}^{2\pi} |I_\phi(a, \phi', 0)| \cos(\phi') \\ &\quad \times \frac{e^{-j\beta\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}}}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} ad\phi' \\ &= \frac{\mu Ia}{4\pi} \int_{\pi}^{2\pi} \cos(\phi') \\ &\quad \times \frac{e^{-j\beta\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}}}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} d\phi' \end{aligned} \quad (26)$$

이 되며 식 (25), (26)에서  $x' = a\cos(\phi')$ ,  $y' = a\sin(\phi')$ 이다. 따라서 반시계 방향의 전류에 의한 자기밀도는

$$\begin{aligned} \vec{B}_2 &= a_x \left( -\frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + a_y \frac{\partial}{\partial z} A_x \\ &\quad + a_z \left( -\frac{\partial}{\partial y} A_x \right) \Big|_{x=0, y=0, z=0} \\ &= a_y \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\mu Ia}{2\pi} \frac{e^{-j\beta\sqrt{a^2 + z^2}}}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right] \Big|_{z=0} \\ &\quad + a_z \left[ \frac{\mu Ie^{-j\beta a^2}}{4} \left( j\beta + \frac{1}{a} \right) \right] \end{aligned} \quad (27)$$

이다.

3.1.3 인덕턴스 크기 분석

식 (21), (27)로부터 원점에서의 전체 자기 밀도를 구하면

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

$$= a_y \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\mu I}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{e^{-j\beta\sqrt{x'^2+z^2}}}{\sqrt{x'^2+z^2}} dx' + \frac{\mu I a}{2\pi} \times \frac{e^{-j\beta\sqrt{a^2+z^2}}}{\sqrt{a^2+z^2}} \right]_{z=0} + a_z \left[ \frac{\mu I e^{-j\beta a}}{4} \left( j\beta + \frac{1}{a} \right) \right] \quad (28)$$

이 된다.

그런데 식 (12)에서  $\vec{ds}$ 는 z방향이므로  $\vec{B} \cdot \vec{ds}$ 는 z방향 성분만이 계산된다. 따라서 전류 루프 내에서 균일한 자기장 분포를 가정하면 식 (13)로부터 인덕턴스  $L_k$ 는

$$L_k \approx \frac{\mu e^{-j\beta a}}{4} \left( j\beta + \frac{1}{a} \right) \frac{\pi a^2}{2} \quad (29)$$

다. 이 식을 이용하여 반지름  $a$ 가 1,2,3,4,5(cm)인 루프에 의해 형성되는 인덕턴스 성분을 계산한 결과가 그림 7로 반지름이 증가할수록 형성되는 인덕턴스의 크기가 증가함을 알 수 있다.

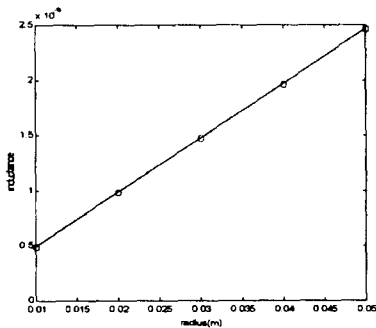


그림 7 실험물 II에서 계산에 의한 인덕턴스와 반지름과의 관계

Fig. 7 Calculated relation between radii and inductances in test specimen II

### 3.2 실험

#### 3.2.1 실험 방법

그림 3, 4의  $V_{in}$ 에 여러 주파수대의 정현파를 인가하고 전류 프로브를 사용하여 각 경로에 흐르는 전류를 측정한다. 측정 결과로부터 주파수대에 따라 그 경로에 흐르는 전류의 크기 및 전체 전류와의 비를 살펴 봄으로써 주파수에 따른 전류 분포의 변화를 파악한다. 측정 주파수 영역은 10Hz에서 10MHz까지로 10, 100, 1k, 10k, 100k, 500k, 1M, 5M, 10MHz의 9점의 주파수에서 측정하였다.

그림 3, 4의  $V_{in}$ 에 여러 주파수대의 정현파를 인가하고 전류 프로브를 사용하여 각 경로에 흐르는 전류를 측정한다. 측정 결과로부터 주파수대에 따라 그 경로에 흐르는 전류의 크기 및 전체 전류와의 비를 살펴 봄으로써 주파수에 따른 전류 분포의 변화를 파악한다. 측정 주파수 영역은 10Hz에서 10MHz까지로 10, 100, 1k, 10k, 100k, 500k, 1M, 5M, 10MHz의 9점의 주파수에서 측정하였다.

전압원은 0.01Hz에서 13MHz까지의 함수를 공급할 수 있는 HP 3312A를 사용하였고 전류 프로브는 Tektronix TM 502A를 사용하였는데 이 프로브는 최대 24A의 전류까지 측

정가능하며 50MHz의 bandwidth를 가진다. 그리고 오실로스코프는 2GSa/s의 샘플 rate와 500MHz의 아날로그 bandwidth를 가지는 HP 54522A를 사용하였다.

#### 3.2.2 실험 결과 및 분석

실험 결과는 표 1, 2, 3과 그림 8, 9, 11에 정리하였다. 표1, 2는 실험물 I에서 경로별로 측정된 전류의 크기와 전류 비율, 표 3은 실험물 II에서의 전류의 크기를 나타내며 그림 8, 9, 11은 각각 표 1, 2, 3을 나타낸 그림이다.

표 1 실험물 I의 전류 측정결과

Table 1 measured current of each path in test specimen I

주파수 (Hz)	각 경로로 흐르는 전류(mA)					
	1번	2번	3번	4번	5번	6번
10	41.8	37.5	35.6	32.5	30.1	28.6
100	44.0	38.5	36.4	34.4	32.0	30.6
1k	40.1	35.8	33.6	32.2	31.4	30.0
10k	28.0	24.3	24.3	27.3	35.0	65.9
100k	19.0	12.7	13.8	17.5	31.6	106.6
500k	17.5	11.5	12.7	16.5	30.6	107.2
1M	17.8	11.4	12.8	16.7	31.4	109.6
5M	17.9	11.3	12.6	16.8	31.7	112.9
10M	16.7	11.0	12.1	15.9	30.4	108.8

표 1은 실험물 I에서 주파수별로 각 경로에 흐르는 전류를 측정된 결과로 가로는 전류 경로, 세로는 주파수별 전류 크기이다. 표 1에서 경로의 길이는 가장 짧으나 형성하는 루프 면적은 가장 큰 1번 경로를 보면 10Hz에서는 41.8(mA)가 흐르다가 10MHz에서는 16.7(mA)가 흐른다. 그리고 경로의 길이는 가장 길지만 루프 면적이 가장 작은 6번 경로에서는 10Hz에서 28.6(mA)가 10MHz에서는 108.8(mA)가 흐른다. 그러므로 주파수가 증가하면 신호선과 가장 작은 루프 면적을 형성하는 6번 경로로 전류가 몰려 흐름을 알 수 있다.

전류의 분포를 살펴 보기 위하여 각 경로의 전류를 비로써 나타낸다. 표 2는 표 1에서 각 경로에서의 전류가 전체 전류에서 차지하는 비율을 나타낸 것으로 가로는 전류 경로, 세로는 주파수별 전류 비율이다. 주파수가 10Hz일 때의 전류분포는 경로의 길이가 가장 짧은 1번으로 전체 전류의 20.28(%)가 흘러 가장 많은 전류가 흐르고 경로의 길이가 가장 긴 6번으로는 전체 전류의 13.88(%)가 흘러 가장 적게 흐른다. 그에 비해 주파수가 10MHz일 때의 전류분포를 보면 전체 전류의 55.82(%)가 경로의 길이는 가장 길지만 루프 면적을 가장 작게 형성하는 6번으로 몰려 흐른다. 즉, 주파수가 증가할수록 전류가 신호선의 주변으로 몰리며 비록 신호선의 경로 길이가 길지라도 일정 주파수 이상에서는 도체에서 신호선의 바로 아래 경로가 주된 경로가 된다. 그러므로 고주파 전류의 경우 전압을 인가하는 신호선을 원하는 전류 경로 형태로 놓음으로써 도체에서 되돌아가는 전류의 주된 경로를 유도할 수 있다.

그림 8은 표 2에서 나타난 주파수에 따른 전류 분포의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 '\*'이 10Hz일 때 각 경로에

서의 비율이고 '+'이 10kHz일 때의 비율, 'o'이 10MHz일 때의 비율이다. 그림을 보면 10Hz일 때는 6번에서 1번 경로로 갈수록, 즉 경로의 길이가 감소할수록 흐르는 전류가 증가하고 10MHz일 때는 2번에서 6번 경로로 갈수록, 즉 형성하는 전류루프의 면적이 작을수록 흐르는 전류가 증가한다. 그리고 10Hz, 10kHz, 10MHz로 주파수가 증가함에 따라 6번 경로로 흐르는 전류의 비율은 증가하고 1번 경로로 흐르는 전류의 비율은 감소한다. 각 경로간의 연결선은 같은 주파수에서 전류의 분포를 쉽게 알아 볼 수 있도록 한 것이다.

표 2 실험물 I에서 전류의 분포

Table 2 current distribution of each path in test specimen I

주파수 (Hz)	각 전류 경로에 흐르는 전류(%)					
	1번	2번	3번	4번	5번	6번
10	20.28	18.20	17.27	15.77	14.60	13.88
100	20.38	17.83	16.86	15.93	14.82	14.17
1k	19.74	17.63	16.54	15.85	15.46	14.77
10k	13.67	11.87	11.87	13.33	17.09	32.18
100k	9.44	6.31	6.86	8.70	15.71	52.98
500k	8.93	5.87	6.48	8.42	15.61	54.69
1M	8.91	5.71	6.41	8.36	15.72	54.88
5M	8.81	5.56	6.20	8.27	15.60	55.56
10M	8.57	5.64	6.21	8.16	15.60	55.82

그림 9는 주파수에 따른 1번, 6번 경로에서의 비율을 나타낸 것이다. 그림에서 'o'이 1번 경로의 전류비, '\*'이 6번 경로의 전류비로 100kHz이상의 주파수에서는 전체 전류의 50% 이상이 6번 경로로 흐름을 알 수 있다.

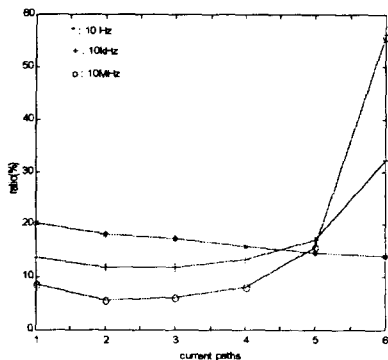


그림 8 실험물 I에서 주파수에 따른 전류 분포의 변화

Fig. 8 Current distribution in test specimen I

이와 같은 결과를 2장의 이론적 분석 결과와 비교, 확인한다. 주파수가 낮은 경우에는 임피던스에서 저항성분  $R$ 이 주된 요인이고  $R$ 은 식 (11)에 의해 전류 경로의 길이와 비례하므로 저주파 전류의 경우  $R$ 이 작은, 즉 길이가 짧은 경로가 주된 경로가 된다. 그러나 주파수가 높은 경우에는 인덕턴스  $L$ 이 주된 요인이 되고  $L$ 은 식 (12)에서 루프 면적  $S$ 와 양의 상관 관계가 있으므로 고주파 전류에서는  $L$

이 작을, 즉 루프 면적이 작은 경로가 주된 경로가 된다. 그러므로 고주파 전류는 루프 면적을 작게 형성하는 경로로 몰려 흐르게 되고 이와 같은 성질을 이용하여 전류의 경로를 유도할 수 있다. 즉, 도체에서 전압을 인가하는 신호선을 원하는 경로 형태로 위치시키면 도체로 되돌아 오는 고주파 전류는 신호선과의 인덕턴스 성분을 최소화 하기 위하여 신호선 바로 아래로 몰려 흐르게 된다. 따라서 신호선의 형태를 조절함으로써 도체에서의 전류의 분포와 주된 경로를 조절할 수 있다.

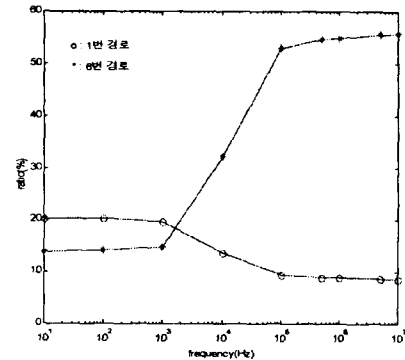


그림 9 실험물 I에서 주파수에 따른 1번, 6번 경로의 전류 비율

Fig. 9 Current ratios of 1st and 6th path in test specimen I

그림 9에서 1kHz이하와 100kHz이상의 주파수 영역에서는 주파수에 대하여 전류의 비가 거의 일정하고 1kHz에서 100kHz사이의 영역에서는 주파수에 따라 전류의 비가 변한다. 전류의 비가 일정한 것은 임피던스의 비가 일정하다는 것을 뜻하며 따라서 1kHz이하와 100kHz이상의 주파수 영역에서는 임피던스의 비가 주파수에 대하여 일정하다는 것을 알 수 있다. 이는 전류의 분포가 저주파에서는 저항성분에 의해서만, 고주파에서는 인덕턴스 성분에 의해서만 결정되고 주파수에 독립적이라는 이론적 분석에서의 식 (7), (9)의 결과와 일치한다. 또한 1kHz에서 10kHz사이의 주파수 영역에서도 전류의 비가 주파수에 따라 변한다는 식 (10)의 결과와 부합됨을 알 수 있다.

실험물 I에서 저항 성분  $R$ , 인덕턴스 성분  $L$ 값을 추정하고 식 (10)에 따른 전류 분포와 실험 결과를 비교한다.  $R$ ,  $L$ 값은 주파수에 따른 변화를 무시하고 상수라고 가정한다. 각 경로별로  $R$ 은 식 (11)에 의해 구하고  $L$ 은  $R$ 과 표 2로부터 추정하였다. 그런데 식 (29)에 의해 인덕턴스 성분을 계산할 때 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 전류는 모두 결합주위로 몰려 흐른다.
2.  $\mu$ ,  $\epsilon$ 이 주파수에 대해 일정하다.
3. 루프 내에서의 자기 밀도의 분포는 균일하다.

그러므로 실제 인덕턴스  $L_k$ 들은 식 (29)에 의해 계산된 값들에 상수배를 함으로써 가정의 영향을 보정한다. 이와 같이 구한  $R$ ,  $L$ 에 의해 주파수대별로 각 경로의 전류비를 시뮬레이션하여 실험 결과인 그림 9와 비교한다.

그림 10은 1번과 6번 경로의 전류비를 시뮬레이션한 결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 그림에서 'o'는 시뮬레이션에 의한 1번 경로, 'o'는 실험에 의한 1번 경로, '\*'는 시뮬레이션에 의한 6번 경로, 'd'는 실험에 의한 6번 경로의 전류비이다. 그림으로부터 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 거의 근사함을 알 수 있다.

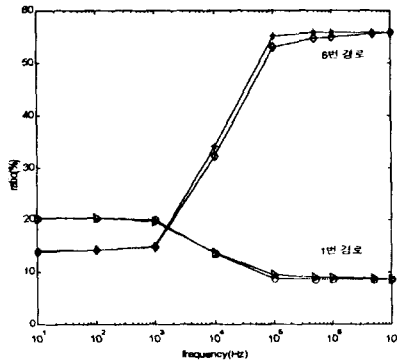


그림 10 실험물 I에서 1번, 6번 경로의 전류비 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 10 Comparison of current ratios in test specimen I

다음은 실험물 II의 실험결과이다. 표 3은 실험물 II에서 주어진 주파수별로 각 경로에 흐르는 전류를 측정 한 결과로 가로는 전류 경로, 세로는 주파수별 전류 크기이다. 표에서 경로의 길이와 루프 면적이 모두 가장 작은 1번 경로에서의 전류는 10Hz에서 43.3(mA)가 흐르다가 10MHz에서 104.2(mA)가 흐르고 경로의 길이와 루프 면적이 모두 가장 큰 6번 경로에서는 10Hz에서 34.9(mA)의 전류가 흐르다가 10MHz에서 17.5(mA)가 흐른다. 그러므로 실험물 II에서도 주파수가 증가하면 루프 면적이 작은 1번 경로로 흐르는 전류가 증가함을 알 수 있다.

그림 11은 실험물 I에서와 같이 실험물 II에서 1번, 5번 경로로 흐르는 전류의 비율 주파수별로 파악한 것이다. 그림에서 실험물 I의 실험과 마찬가지로 주파수가 증가할수록 루프면적이 작은 1번 경로로 전류가 많이 흐른다. 이와 같은 실험 결과로부터 고주파 전류는 루프 면적이 작은 경로로 가장 많은 전류가 흐르므로 신호선의 형태를 조절하여 전류의 주된 경로를 유도할 수 있음을 확인하였다. 즉, 신호선과 원하는 전류의 경로가 형성하는 루프 면적이 가장 작게 되도록 신호선을 위치시킴으로써 고주파 전류가 원하는 경로로 흐르도록 유도할 수 있다.

이 장에서는 실험물 I, II에서 주파수에 따른 전류 분포를 실험을 통하여 살펴보고 이를 이론적 분석 결과와 비교, 확인하였다. 낮은 주파수에서는 길이가 작아 저항 성분이 작은 경로로 많은 전류가 흐르다가 주파수가 증가함에 따라 인덕턴스 성분이 작은, 즉 루프 면적이 작은 경로로 많은 전류가 흐름을 알 수 있었다. 그러므로 고주파에서의 이와 같은 성질을 이용하면 주파수와 신호선의 위치 및 형태를 조절하여 전류의 분포를 제한하고 전류의 주된 경로를 유도할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 전류의 수평적 분포를 분석하고 실험을 통하여 전류가 원하는 경로로 흐르도록 유도할 수 있음을 확인하였다. 전류 분포를 살펴 보기 위하여 도체를 모델링하고 전류 경로의 길이, 형성되는 루프 면적등의 기하학적 형태와 주파수가 전류 분포에 주는 영향을 분석하였다.

표 3 실험물 II의 전류측정결과

Table 3 measured current of each path in testspecimen II

주파수 (Hz)	각 경로로 흐르는 전류(mA)				
	1번	2번	3번	4번	5번
10	43.3	41.7	39.4	37.0	34.9
100	46.4	44.6	42.7	40.4	37.8
1k	43.4	41.8	39.3	37.2	35.4
10k	61.8	43.7	34.6	30.0	28.1
100k	103.5	39.7	24.5	19.3	20.0
500k	104.8	36.6	22.8	17.9	18.6
1M	104.2	36.6	22.5	17.9	18.5
5M	108.4	37.5	22.4	17.4	18.3
10M	104.2	36.1	21.6	16.6	17.5

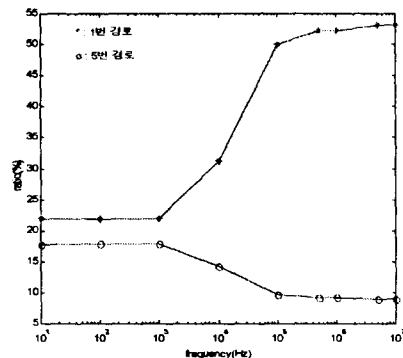


그림 11 실험물 II에서 주파수에 따른 1번, 5번 경로의 전류 비율

Fig. 11 Current ratios of 1st and 5th path in test specimen II

그리고 이로부터 신호선에 의해 형성되는 전류 경로의 기하학적 형태를 조절함으로써 고주파 전류의 수평적 분포를 제한하고 전류의 주된 경로를 유도할 수 있음을 알았으며 주파수별 전류 분포 측정 실험을 통하여 이와 같은 고주파 전류의 경로 유도 특성을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] D.K. Cheng, "Field and Wave Electromagnetics", ADDISON WESLEY, 1992.
- [2] P. Lorrain, D.R. Corson, "Electromagnetic Fields and Waves", W.H.Freeman and company, 1970.
- [3] C.A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", WILEY, 1989
- [4] H.W. Johnson, Martin Graham, "High-Speed Digital Design", PRENTICE HALL, 1993

- [5] J.W. Nilsson, "Electric Circuits", Addison Wesley, 1993  
[6] L.O. Chua, C.A. Desor and E.S. Kuh, "Linear and Nonlinear Circuits", McGRAW-HILL, 1987

## 저 자 소 개



임 한 상(林漢尙)

1972년 4월 24일 생. 1996년 서울대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학교 전기공학부 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 박사 과정

Tel : 888-8374

E-mail : lhs@camus.snu.ac.kr



박 재 홍(朴宰弘)

1961년 1월 11일생. 1983년 서울대 공대 제어계측공학과 졸업. 1984년 미시간 주립대 졸업(석사). 1991년 미시간대 졸업(공학박). 1991년 - 1994년 미시간대 전자공학부 연구조교수, Vehicular Electronics Laboratory Assistant Director. 1994년 - 현재 서울대 공대 전기공학부 부교수.

Tel : 880-8880

E-mail : jaehong@asri.snu.ac.kr