

Magneto-inductive Wave in Periodic Chain of Ferrite Cores and Chip Capacitors

Kwang-Ho Shin*

Department of Information & Communication Engineering, Kyungsoong University, Busan 608-736, Korea

(Received 6 February 2015, Received in final form 16 February 2015, Accepted 16 February 2015)

In this paper, a magneto-inductive wave generated in a chain of LC resonators fabricated with Ni-Zn ferrite cores and chip capacitors is presented. RF signal propagates to neighbor resonator one by one as a consequence of the magnetical coupling between two resonators in the device. The magnetical coupling is due to the mutual inductances along the chain of resonators. So, the signal amplitude (\approx coupling intensity) is dependent of the mutual inductance which can be adjusted by applied magnetic field. In order to demonstrate the device, some experiments have been carried out systemically. The transmission characteristics of a magneto-inductive wave could be controlled by applied external magnetic field. The device composed of 5 resonators; the center frequencies were estimated to be 32 MHz and 38 MHz with the external magnetic flux density of 75 Oe and 222 Oe, respectively. We expect that the reported results could open a promising way to a high variety of applications in one- and two-dimensional functional devices, such as transducers, delay lines, power dividers and couplers.

Keywords : magneto-inductive wave, ferrite core, periodic chain

페라이트 코어와 칩캐패시터의 주기적 연결구조에서 발생하는 자기유도파

신광호*

경성대학교 정보통신공학과, 부산시 남구 대연동 110-1, 608-736

(2015년 2월 6일 받음, 2015년 2월 16일 최종수정본 받음, 2015년 2월 16일 게재확정)

이 논문에서 Ni-Zn 페라이트 코어와 칩캐패시터를 이용하여 제작한 주기적인 연결구조에서 발생하는 자기유도파(magneto-inductive wave)에 대한 실험적 결과를 보고 한다. 주기적 연결구조는 동일한 공진주파수를 가진 LC공진기(LC resonator)로 되었으며, 개별 공진기는 도선과 칩캐패시터로 구성되었다. 인접하는 공진기들은 페라이트코어를 통해서 자기적으로 결합되었다. 제작된 주기적 구조의 특성을 검토하기 위해서 네트워크 아날라이저를 이용한 S-파라미터를 분석하여 신호전송특성을 평가하였다. 5개의 LC공진기를 1차원적으로 연결하여 제작한 주기구조의 신호전송 중심주파수는 32 MHz~38 MHz였으며, 이는 인가자계의 크기에 의해서 조정할 수 있었다.

주제어 : 자기유도파, 페라이트 코어, 주기구조

I. 서 론

자기적으로 결합되는 주기 구조(magnetically coupled periodic structure)를 신호처리 필터, 지연과 디바이스(slow wave device), 플로톤 가속기(proton accelerator) 등에 응용하기 위한 연구가 주목을 받고 있다[1, 2]. 특히, 2002년 Samonina 등이 자기유도(magneto-inductive; MI)파 도파관에 대한 연구를 발표한 이후에 많은 연구자들이 자기유도파 및

자기적으로 결합된 주기적 구조체를 통한 신호전송에 대해서 관심을 가지고 있다[3, 4]. MI파는 1차원이나 2차원으로 규칙적으로 배열된 공진소자를 통해서 전파될 수 있다. MI파 디바이스에서 신호전송은 규칙적으로 배열된 개별 공진기에서 발생한 자계에 의해서 인접한 공진기(자기적으로 결합된)에서 유도기전력(electromotive force)이 발생하고, 이 유도기전력에 의해서 흐르는 전류(공진 주파수의)에 의해서 다시 발생한 자계에 의해서 일어난다. 실제로, MI파는 동일한 공진 주파수를 가진 LC공진기들의 규칙적인 배열에 의해서 항상 일어날 수 있으며, 일반적으로 MI파 디바이스는 캐패시터를 연결한 금속 페루프로 구성된다[3-5]. MI파가 캐패시터를 연

결한 금속구조체에 의해서 발생할 수 있고, 이는 자기적인 결합(magnetic coupling)에 의해서 전송되는 것이지만, 아직까지 자성체를 이용한 MI파의 실험적 연구는 없는 것으로 조사되었다. MI파가 자기적 결합에 의해서 전송되는 것이기 때문에, 자성체 (혹은 자성체의 특성)를 이용하면 외부자계(혹은 전류인가)를 이용하여서 MI파 디바이스에서의 신호전송특성을 가변시킬 수 있다는 것은 쉽게 예측할 수 있다.

본 연구의 목적은 자성체를 이용하여서 구현되며 자기적인 방법으로 특성을 제어할 수 있는 MI파 디바이스의 실현 가능성을 조사하는 것이다. 이를 위해서, 금속루프와 칩캐패시터를 이용하여 제작된 공진기들을 Ni-Zn 페라이트 코어를 이용하여서 연결한 MI파 디바이스를 제작하고, 제작된 MI파 디바이스의 신호전송특성을 조사하였다.

II. 실험방법

Fig. 1은 제작한 MI파 디바이스의 사진(a)과 개념도(b), 등가회로(c)를 함께 나타낸 것이다. 등가회로 상에서는 구리선 선과 인덕턴스의 저항성분과 캐패시터의 컨덕턴스성분, 그리고 페라이트 코어의 손실성분(저항성분)은 무시하여 나타내

Table I. Complex relative permeability of ferrite core.

f [MHz]	1	2	5	10	20	50
μ'	1589	1102	520	278	138	40
μ''	107	740	601	421	290	155

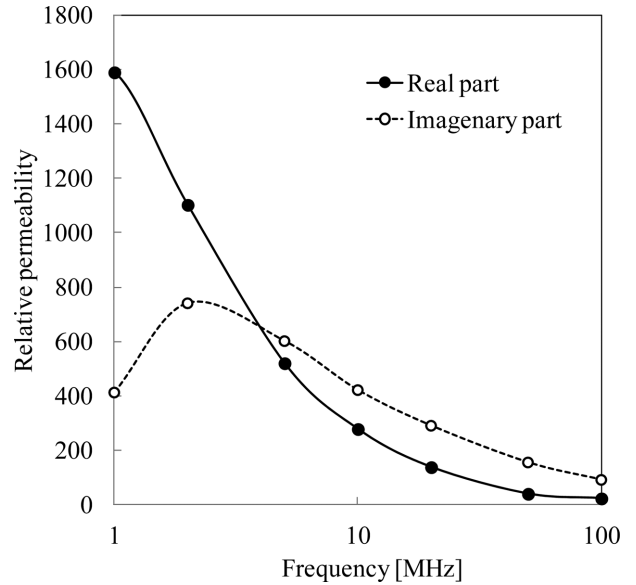


Fig. 2. Complex relative permeability of ferrite core.

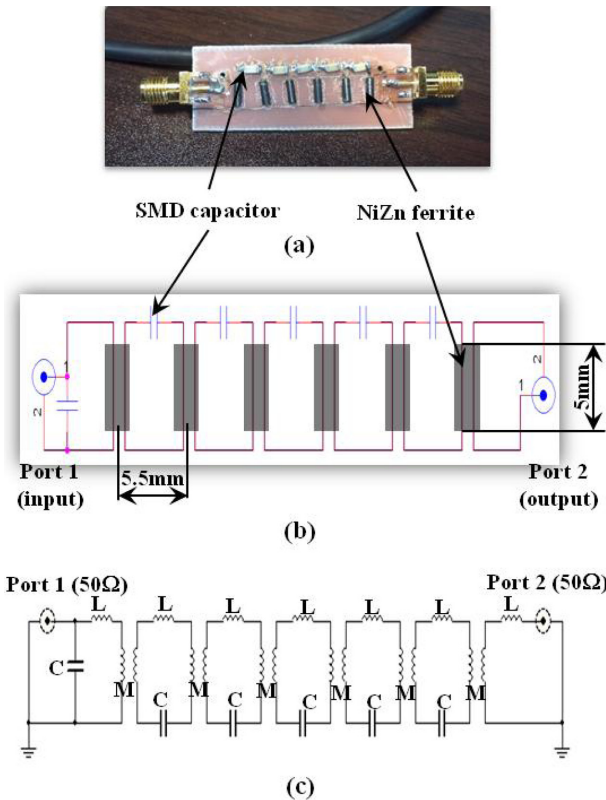


Fig. 1. (Color online) Photograph (a) schematic view (b) and equivalent circuit (c) of the fabricated magneto-inductive device with chip capacitors and Ni-Zn ferrite core.

지 않았다. 실제로 사용한 페라이트 코어의 투자율의 주파수의 의존성(Table I 및 Fig. 2 참조)을 살펴보면, 본 실험에서의 주파수대역에서의 손실(투자율의 허수부)을 무시할 수 없으나, 본 실험에서는 MI파의 발생에 대한 기초적인 특성을 관찰하는 것이 목적이므로 여기서는 무시하였다. 총 5개의 LC공진기의 예폭시 기판 상에 1차원적 배열로 구성되어 있다. 개별 LC공진기에 인덕터 소자를 설치하지는 않았지만 구리선으로 구성된 사각형 루프에 의해서 인덕턴스가 형성된다.

개별 사각형 루프의 크기는 7.5×5 mm였고, 사각형 루프를 구성하는 구리선의 직경은 0.1 mm였다. 그림 1에서 보여지는 기판은 상대유전율이 4.3인 에폭시 기판(FR-4)를 이용하였으며, 개별 LC공진기의 특성 및 신호 전송에 기판이 영향을 미치지 않도록 하기 위해서 뒷면의 접지 금속면은 완전히 제거하였다. 표피효과와 페라이트 코어의 영향을 무시하여 계산한 금속 루프의 인덕턴스는 16.7 nH였다[6]. 개별 LC공진기들은 튜브형 페라이트 코어를 통해서 자기적으로 결합된다. 본 실험에서 사용한 페라이트 코어는 TDK사의 Ni-Zn 페라이트로 길이 5 mm, 외경 1.8 mm, 내경 0.7 mm였으며, 제품 카탈로그 상에서 나타난 저주파(<1 MHz)에서의 초기상대투자율은 1500, 보자력은 30 A/m, 포화자속밀도는 330 mT였다[7]. 그러나, 본 실험은 수십MHz대역에서 MI파 특성을 조사하는 것이 목적이기 때문에, 페라이트 코어를 관통하는 도체의 인덕턴스

를 측정하여 복소투자율을 측정하였다. Table I와 Fig. 2는 측정된 복소투자율을 주파수에 대해서 나타낸 것이다. 실제로 제작한 LC공진기의 금속 루프의 일부는 페라이트 코어를 관통하고 있기 때문에 인덕턴스의 값은 페라이트와 인가되는 외부자계에 의해서 영향을 받는다. 개별 LC공진기를 구성하기 위한 캐패시터로는 SMD타입의 칩캐패시터(3.2 × 1.6 mm, 1 nF)를 사용하였다. RF신호의 입력과 출력은 SMA커넥터와 특성임피던스가 50 Ω인 동축케이블을 이용하여서 네트워크 아날라이저(HP8753)에 연결하였다. RF신호의 전송특성은 투과법으로 S-파라미터를 측정하여 분석하였다. 이 때, MI파 디바이스의 신호전송특성에 미치는 외부 자계의 영향을 분석하기 위해서 직경 30 cm의 헬름홀츠코일과 바이폴라전원을 이용하였다.

III. 실험결과

주기적 배열을 구성하고 있는 개별 LC공진기의 공진주파수 f_0 는, 구리도선의 저항을 무시하면, 아래의 식으로 계산할 수 있다[8, 9].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

본 실험에서, 페라이트 코어의 영향과 인접하는 공진기의 영향을 무시하는 경우, 사각형 구리도선의 인덕턴스는 16.7 nH로 계산되었고, 캐패시턴스는 1 nF을 설치한 경우, f_0 는 식(1)에 의해서 각각 38.9 MHz로 계산되었다. 그러나, LC공진기를 구성하는 페라이트 자성체의 영향을 무시할 수 없다. 또

한 외부자계가 인가되는 경우에는 페라이트 자성체의 실효투자율이 외부자계에 의해서 변화한다. 따라서, 본 실험에서는 제작한 LC공진기의 공진주파수의 외부자계 의존성을 헬름홀츠코일과 네트워크 아날라이저를 이용하여서 측정하였다. Fig. 3는 LC공진기의 공진주파수에 미치는 외부자계의 영향을 나타낸 것이다.

측정된 공진주파수로부터 페라이트 코어 및 외부자계의 영향을 고려한 공진기의 인덕턴스를 구할 수 있다. 즉, 식(1)을 변환하여 $L = 1/\omega_0^2 C$ 를 이용하여서 인덕턴스를 구할 수 있으며, 여기서 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 이다. Table II는 측정된 공진주파수와 계산된 인덕턴스의 값을 외부자계에 대하여 정리한 것이다.

페라이트 코어의 영향을 고려하지 않았을 때 예측된 공진주파수는 38.9 MHz였으나, 측정된 공진주파수는, 외부자계의 강도에 따라, 28.8~38.1 MHz 사이에서 변화하였다. 이것은 페라이트 코어가 설치됨에 따라서 LC공진기의 인덕턴스값이 커지기 때문이라고 볼 수 있다. 그리고, 페라이트 코어가 없는 금속 루프의 인덕턴스는 16.7 nH였으나, 외부자계가 인가되지 않은 경우 30.5 nH(측정된 공진주파수로부터 계산)였다. 외부자계가 강해짐에 따라 공진주파수는 높아진다. 이것은 여자방향(페라이트 코어의 원주방향)의 페라이트 실효투자율(μ_{eff})이 외부자계가 커짐에 따라서 작아지기 때문이다. 즉, $f_0 \propto 1/\sqrt{L}$ 의 관계가 있고, $L \propto \mu_{eff}$ 의 관계가 있기 때문이다.

Fig. 4은 네트워크 아날라이저로 측정된 신호전송비(S_{21})을 나타낸 것으로, 외부 자계(0~222 Oe)를 달리하면서 측정된 결과이다. 외부자계가 인가되지 않았을 경우에는 20 MHz 이상의 주파수에서 측정된 주파수 대역(~300 MHz)에서 공진이 발생하지 않았다.

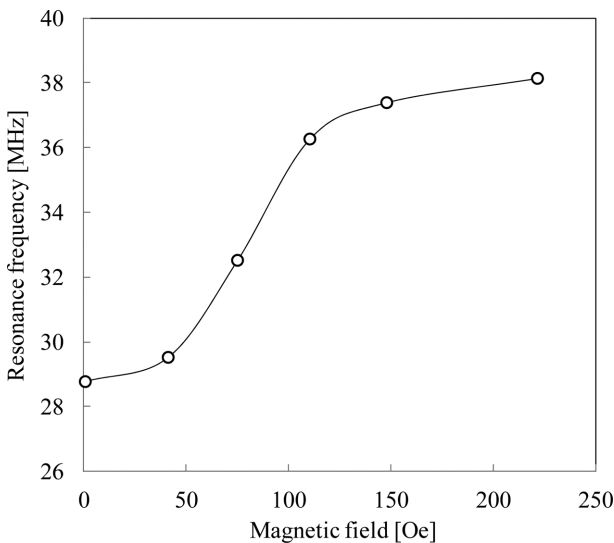


Fig. 3. External magnetic field dependence of resonance frequency of the LC resonator.

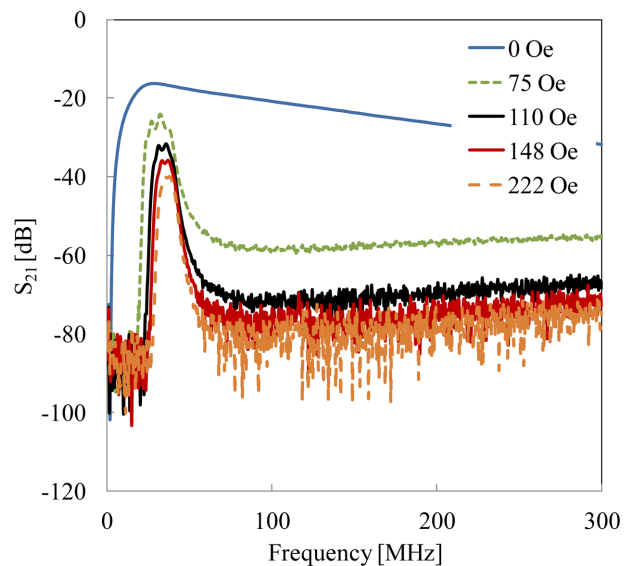


Fig. 4. (Color online) Frequency dependence of S_{21} according to various external magnetic field.

Stevens 등은 공진주파수와 품질계수(Q)가 일정한 경우, MI 파 전달에서의 분산이 결합계수($k = 2ML$)에 의존한다는 것을 보고하였다[10]. 여기서, M 은 인접 공진기사이의 상호인덕턴스를 나타낸다. 그의 계산에 의하면 결합계수가 1에 근접하면 분산이 커져서 신호전달에서의 공진은 보이지 않게 된다. 본 실험에서 페라이트 코어의 복소투자율은 50 MHz에서 $\mu' - j\mu'' = 40 - j155$ (Table I 및 Fig. 2 참조)이었으므로 인접 LC 공진기 사이의 결합계수가 1에 가깝다는 것을 예상할 수 있다. Stevens 등의 연구결과를 인용하면 손실이 없는 MI파 디바이스에서 신호는 식(2)에서 나타난 주파수대역에서 전송된다.

$$\frac{f_0}{\sqrt{1+k}} < f < \frac{f_0}{\sqrt{1-k}} \quad (2)$$

만약 본 실험에서 제작한 MI 디바이스에 자계를 인가하지 않았을 때 $k = 1$ 이라고 가정한다면, $f_0/\sqrt{1-k} = \infty$ 공진이 일어나지 않게 된다. 즉, 외부에서 자계를 인가하지 않았을 때 공진특성, 혹은 밴드패스필터와 같은 특성은 나타나지 않게 된다.

그러나, 여자방향(원주방향)에 대해서 직교방향(페라이트 코어의 길이방향)으로 외부자계를 인가하면 실효투자율은 외부자계의 크기에 반비례하여 줄어든다. 따라서, 외부자계가 인가되면 페라이트 코어의 결합계수가 작아지고 신호전달의 분산이 줄어든다. 따라서, 신호전달에서의 공진이 나타나게 되고, 신호전달의 대역폭은 외부자계의 크기에 반비례하게 된다. 페라이트 코어의 길이방향으로 인가된 자계에 대한 신호전달 공진주파수와 대역폭은 자계가 75 Oe일 때 32.5 MHz와 21 MHz, 자계가 110 Oe일 때 35.5 MHz와 17 MHz, 자계가 148 Oe일 때 36.25 MHz와 16.5 MHz, 자계가 222 Oe일 때 38 MHz와 16 MHz이었다. 외부자계가 증가함에 따라 공진주파수가 높아지고 대역폭이 좁아지는 것은 정성적으로 페라이트 코어의 실효투자율이 감소하기 때문으로 이해할 수 있다. 즉, 페라이트 코어의 실효투자율이 감소하게 되면 결합계수가 작아지게 되므로 식(2)에서 나타난 바와 같이 대역폭이 줄어들게 된다. 또한 실효투자율이 작아지게 되면 인덕턴스가 작아지게 되므로 공진주파수는 증가하게 되는 것이다.

Fig. 4에서 나타난 신호전달 특성을 보면, 외부자계가 75 Oe ~ 222 Oe일 때 S_{21} 이 -25 dB ~ -40 dB 정도이다. 외부자계가 커짐에 따라 S_{21} 이 작아지는 것은 결합계수가 작아지기 때문으로 이해할 수 있다. 즉, 결합계수가 작아짐에 따라 전달되는 신호가 작아 지기 때문이다. 그리고, 공진주파수에서 S_{21} 가 작은 이유는 페라이트의 손실에 의한 품질계수가 작기 때문으로 예측된다. Cannon 등은 다수의 LC공진기로 연결된 전송선로에서 품질계수의 차이에 따르는 신호감쇠를 계산하였다[11]. 그 결과 LC공진기 내부에 존재하는 저항에 의한 품질계수의 저하로 인해서 S_{21} 이 약 -14 dB에서 -52 dB까지

저하될 수 있음을 보였다. 본 실험에서 사용한 페라이트 코어의 복소투자율의 허수부가 측정 주파수대역에서 크게 나타나므로 디바이스의 품질계수는 크지 않을 것으로 예상되며, 이로 인해서 S_{21} 이 작게 나타난 것으로 예측된다. 페라이트 코어의 복소투자율에 의한 품질계수는 $Q = \mu'/\mu'' = \omega L_f/R_f$ 로 표현할 수 있다. 여기서, L_f 와 R_f 는 각각 페라이트 코어를 관통하는 도선에 전류를 흘렸을 때 발생하는 인덕턴스와 저항(손실)성분을 나타낸다. Table I과 Fig. 2에서 나타난 바와 같이, 본 실험에서 사용한 페라이트 코어의 투자율의 허수부가 측정대역에서 크게 나타나므로, 품질계수가 크지 않을 것으로 짐작할 수 있다. 이러한 관계를 정량적으로 계산하기 위해서는 외부자계에 의존하는 결합계수와 페라이트의 손실에 의해서 저하되는 품질계수를 정확하게 계산할 수 있어야 하고, 이를 위해서 향후 FEM 해석을 수행할 예정이다.

Fig. 5는 페라이트 코어의 길이방향으로 인가된 외부자계의 크기에 대한 공진주파수와 신호전달대역폭을 나타낸 것이다.

외부자계가 커질수록 공진주파수는 높아진다. 페라이트 코어의 자기적 특성(외부자계에 의존하는)은 인접 공진기사이의 상호인덕턴스(M)뿐 아니라 자체인덕턴스(L)에도 영향을 미친다. 즉, 외부자계가 강해지면 페라이트 코어의 실효투자율이

Table II. Resonance frequencies and inductance values of LC resonator dependent on external magnetic field. Inductance values were calculated by measured resonance frequencies.

H_{ex} [Oe]	0	41	75	110	148	222
f_0 [MHz]	28.8	29.5	32.5	36.3	37.4	38.1
L [nH]	30.5	29.1	24	19.2	18.1	17.4

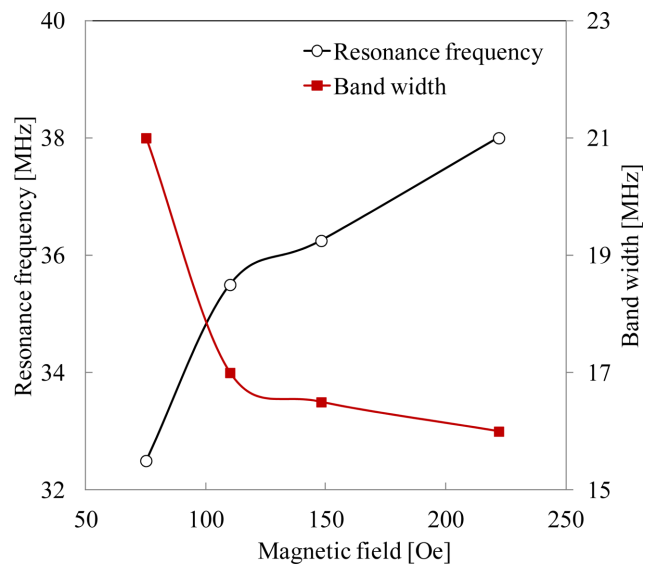


Fig. 5. (Color online) External magnetic field dependence of resonance frequency and band width.

작아지고, 이는 L 이 작아지는 결과로 이어지므로, 외부자계에 의해서 공진주파수($f_0 \propto 1/\sqrt{L}$)가 외부자계에 의해서 높아지는 것이다. 신호전달대역폭이 외부자계에 의해서 줄어드는 것은 앞에서 기술한 MI파의 분산특성과 결합계수의 관계로 설명할 수 있다(식(2) 참조). 상호인덕턴스는 투자율에 직접 비례한다. 따라서, 외부자계가 커지면(실효투자율이 작아지면) 상호인덕턴스가 작아지며 결합계수도 작아지게 된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 Ni-Zn 페라이트 코어와 칩캐패시터를 이용하여서 제작한 LC공진기의 주기적 결합구조에서 발생하는 자기유도파에 대해서 실험적으로 분석하였다. 외부자계가 없는 경우 신호전달의 분산이 커서 자기유도파의 발생이 되지 않았고 이는 인접 공진기사이의 결합계수가 너무 크기 때문인 것으로 고찰되었다. 외부자계가 75 Oe 이상일 때에는 자기유도파가 발생하였으며, 외부자계가 증가할 수록 공진주파수(32~38 MHz)는 높아졌고 신호전달대역폭(21~16 MHz)은 줄어들었다. 이는 공진기를 구성하는 페라이트 코어의 실효투자율이 외부자계의 증가에 따라 작아지고, 상호인덕턴스와 결합계수가 실효투자율에 비례하기 때문에 파악되었다. 본 연구는 인접하는 공진기를 페라이트 코어를 이용해서 체인형으로 결합시킨 자기유도파 디바이스의 기초적 신호전달 특성에 관한 것으로, 신호전달대역의 특성이 밴드패스필터와 같이 나타난다. 따라서, 직접적인 전기적 접속 없이 신호 대 잡음비가 매우 높은 신호를 전달할 수 있는 디바이스를 구현하는 데에 이용될 수 있으므로 Wearable 장치의 신호전달을 위해서 응

용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Filippo Capolino, Theory and phenomena of metamaterials, CRC Press (2009).
- [2] L. Brillouin, Wave propagation in periodic structures, Dover, New York (1953).
- [3] E. Shamonina, V. A. Kalinin, K. H. Ringhofer, and L. Solymar, J. Appl. Phys. **92**, 6252 (2002).
- [4] E. Shamonina, V. A. Kalinin, K. H. Ringhofer, and L. Solymar, Electron. Lett. **38**, 371 (2002).
- [5] M. J. Freire, Appl. Phys. Lett. **85**, 4439 (2004).
- [6] E. B. Rosa, Bulletin of the Bureau of Standards **4**, 301 (1908).
- [7] <http://product.tdk.com/ja/catalog/ferrite.php>.
- [8] Michael J. Simon and Chris Langer, AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition, 1 (2009).
- [9] C. R. Paul, Inductance: Loop and Partial, John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA (2010).
- [10] Christopher J. Stevens, Christopher W. T. Chan, Konstantinos Stamatis, and David J. Edwards, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques **58**, 1248 (2010).
- [11] Benjamin L. Cannon, James F. Hoburg, Daniel D. Stancil, and Seth Copen Goldstein, IEEE Trans. Power Electronics **24**, 1819 (2009).