

# Quasi Möbius Strip과 Via-Hole 구조를 응용한 선로결합 현상의 완화 및 소형화 설계

김미정\*, 박성균\*, 노승환\*\*

## Reduced Electrical Coupling Effect and Miniaturized Antenna Using Quasi Möbius Strip with Via-Hole

Mi Jung Kim\*, Seong Gyoon Park\*, Soong Hwan Ro\*\*

### 요약

RF소자의 소형화 기법으로는 헬리컬 구조를 적용하는 방법, Meta Material을 사용하는 방법 및 적층구조를 적용하는 방법 등 여러 방법들이 적용되고 있다. 그러나 헬리컬 구조는 한 번의 원주의 회전이 있을 때 마다 공진주파수가 생김에 따라 단일 공진주파수 특성을 가지는 RF회로의 소형화 기법에는 맞지 않으며, Meta Material과 적층구조를 적용하는 방법들은 구조가 복잡하며 비용이 많이 드는 단점이 있다. 또한, 3차원 구조의 기본적인 피비우스 스트립을 활용한 논문과 피비우스 스트립의 특성을 활용한 평판형 구조의 논문이 제안되었으나 완전한 평판형 구조가 아니고, 선로결합효과(coupling effect) 현상의 문제점이 있었다. 따라서 본 논문은 기존 Möbius Strip과 위상동형인 Quasi Möbius Strip과 via hole구조를 응용함으로써, RF회로의 소형화와 선로결합효과를 완화한 안테나를 제시하였다. 본 논문의 시뮬레이션 결과에 의하면, 2.4GHz의 공진주파수 일 때, 기존의 링 안테나와 대비하여 물리적 원주의 길이는 1/3배로 소형화 되었다. 그리고 기존의 헬리컬 안테나의 다중공진특성이 아니라 단일 주파수에서의 공진특성을 보인다. 또한, 2.4GHz의 공진주파수 근처에서 선로결합 효과 현상이 거의 발생하지 않았다.

**Key Words** : Möbius Strip, Quasi Möbius Strip, Miniaturization, Coupling Effect, via hole

### ABSTRACT

Minimization techniques are adaptations of Helical structure, Meta material, multi-layer structure etc. But, Helical structure is not suited to minimization technique of RF circuit having single resonant frequency. Because it generate resonant frequency following as rotation of circumference. Meta material and multi layer structure have weakness of expenditure and complex structure. In addition, conventional three dimensional Möbius Strip and planar Möbius Strip are not two dimensional planar Möbius Strip that has weakness of electrical coupling effect. Therefore, in this paper, we proposed miniaturized and reduced electrical coupling effect antenna by adaptation of Quasi Möbius Strip that topology is same as three dimensional Möbius Strip with Via-Hole structure. According to the simulation result, physical circumferential length is 1/3 minimized compared with conventional ring antenna under the same resonant frequency. In addition, coupling effect is not nearly generates near to the resonant frequency, 2.4GHz.

◆ 주저자 : 공주대학교 정보통신공학부, silentkim@kongju.ac.kr, 학생회원

\* 공주대학교 정보통신공학부, psk@kongju.ac.kr, 중신회원

\*\* 공주대학교 정보통신공학부, rosh@kongju.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2013-07-278, 접수일자 : 2013년 7월 3일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 8일

## I. 서 론

뫼비우스 스트립의 실용적인 정의는 다음과 같다. "A One-sided surface that is constructed from a rectangle by holding one end fixed, rotating the opposite end through 180°, and applying it to the first end."<sup>[1]</sup>

Möbius Strip은 한 개의 면을 가지고 있다. Möbius Strip은 원통과 유사하지만, 일반적인 표면이라기보다는 경계를 가진 표면이다. 그리고 Möbius Strip은 3차원의 닫힌 공간이 아니며, 2차원의 열린 공간이다. 뫼비우스 스트립은 inner space와 outer space가 180°의 위상차를 가지고 있다. 즉, inner space와 outer space가 분리된 공간이 아닌 연결되어 있는 open space의 특성을 가진다. Möbius Strip의 이러한 특성을 활용하여, 안테나 및 오실레이터, 공진기 등의 RF수동소자들이 소형화 될 수 있다. 따라서 Möbius Strip은 원주를 따라 잘랐을 때, 두 개의 스트립으로 분리되는 것이 아니라, 원주의 길이가 자르기 전의 2배가 되는 하나의 스트립이 되는 특성이 있다.

Möbius Strip을 원주를 따라서 여러 번 자르면, 예상 밖의 결과를 가져오는 데, 뫼비우스 스트립이 1번 꼬여져(twisted) 있을 때에는 다음과 같은 식으로 유도할 수 있다. 만약에, 원주를 따라서 자르는 횟수 N이 0이라면,

$$M(t,s) = [R + s \cdot \cos(\frac{1}{2}t)] \cdot \cos(t), \quad (1)$$

for  $0 \leq t \leq \pi$

$$M(t,s) = [R + s \cdot \sin(\frac{1}{2}t)] \cdot \cos(t), \quad (2)$$

for  $0 \leq t \leq \pi$

where  $s \in [-\omega, \omega]$ ,  $t \in [0, 2\pi]$ ,

R=the radius of the Möbius Strip,

N=Number of cuts of the Möbius Strip

식 1의  $\cos(t)$  항과 식 2의  $\sin(t)$  항은 180°의 위상 차이를 발생시킨다. 그러므로 함수 M(t, s)는 한쪽 면의 끝이 고정되어 있고, 180° 회전하여 반대 면에서 만나는 것을 나타낸다. Fig.1은 식 1과 식 2를 참고하여 뫼비우스 스트립을 시뮬레이션 한 것이다.

표 1은 Möbius Strip을 원주를 따라 잘랐을 때의 number of cuts에 따른 뫼비우스 스트립의 특성표이다.

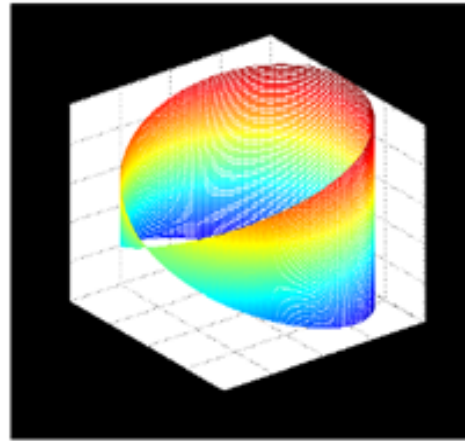


그림 1. Matlab으로 시뮬레이션 된 뫼비우스 스트립  
Fig. 1. Configuration of the simulated Möbius Strip with matlab (N=0)

표 1. 원주를 따라 잘려진(N=1,2,3) 뫼비우스 스트립 특성표  
Table 1. Characteristic of the many times bisected Möbius Strip

Half Twist Number	Number of Cuts	Result
1	1	1 band, length 2
1	2	2 bands, length 2
1	3	3 bands, length 2
2	1	2 bands, length 1
2	2	3 bands, length 1
2	3	4 bands, length 1

만약에, 원주를 따라 자르는 횟수(N)가 1이라면, 뫼비우스 스트립의 반지름은 일반적인 뫼비우스 스트립의 반지름의 2배가 된다. 이때의 뫼비우스 스트립(N=1)의 함수는 다음과 같이 유도된다.

$$M(t,s) = [R + s \cdot \cos(\frac{t}{4})] \cdot \cos(\frac{t}{2}), \quad (3)$$

for  $0 \leq t \leq 2\pi$

$$M(t,s) = [R + s \cdot \cos(\frac{t}{4})] \cdot \sin(\frac{t}{2}), \quad (4)$$

for  $2\pi \leq t \leq 4\pi$

where  $s \in [-\omega, \omega]$ ,  $t \in [0, 4\pi]$ ,

R=Radius of the Möbius Strip,

N=Number of cuts of the Möbius Strip

만약에, 원주를 따라 자르는 횟수(N)가 2이라면,

Möbius Strip은 2개로 분리되고, 하나의 스트립의 반지름은 다른 하나의 스트립의 1/4배가 된다. 그러므로 피비우스 스트립(N=2)의 함수는 다음과 같이 유도된다.

$$M(t,s) = [R+s \cdot \cos(\frac{t}{4})] \cdot \cos(\frac{t}{2}), \quad (5)$$

for  $0 \leq t \leq 2\pi$

$$M(t,s) = [R+s \cdot \cos(\frac{t}{4})] \cdot \sin(\frac{t}{2}), \quad (6)$$

for  $2\pi \leq t \leq 4\pi$

$$M(t,s) = [R+s \cdot \cos(t)] \cdot \cos(2t), \quad (7)$$

for  $4\pi \leq t \leq 5\pi$

$$M(t,s) = [R+s \cdot \cos(t)] \cdot \sin(2t), \quad (8)$$

for  $5\pi \leq t \leq 6\pi$

where  $s \in [-\omega, \omega]$ ,  $t \in [0, 6\pi]$ ,

R=Radius of the Möbius Strip,

N=Number of cuts of the Möbius Strip

함수 M(t,s)에서 cos(t)항과 sin(t)항의 위상차가 스트립의 반지름의 길이를 결정한다. 스트립의 반지름의 길이는 함수 M(t,s)에서 cos(t)항과 sin(t)항의 위상차가 0°에서 180°의 범위에서 180°일 때와 0°일 때가 가장 크다. 즉, Möbius Strip 은 스트립의 길이가 동일할 때, inner space와 outer space가 180°의 위상차를 가질 때 원주가 최대가 된다.

만약에, 원주를 따라 자르는 횟수(N)가 3이라면, Möbius Strip은 3개로 분리되고, 세 개의 스트립은 같은 반지름을 갖는다. 그러므로 Möbius Strip(N=3)의 함수는 다음과 같이 유도된다.

$$M(t,s) = [R+s \cdot \cos(\frac{2t}{3})] \cdot \cos(\frac{4t}{3}), \quad (9)$$

for  $0 \leq t \leq \pi, 2\pi \leq t \leq 3\pi, 4\pi \leq t \leq 5\pi$

$$M(t,s) = [R+s \cdot \cos(\frac{2t}{3})] \cdot \cos(\frac{4t}{3}), \quad (10)$$

for  $0 \leq t \leq \pi, 2\pi \leq t \leq 3\pi, 4\pi \leq t \leq 5\pi$

함수 M(t,s)에서 cos(t)항과 sin(t)항의 위상차가 스트립의 반지름의 길이를 결정한다. 스트립의 반지름의 길이는 함수 M(t,s)에서 cos(t)항과 sin(t)항의 위상차가 0°에서 180°의 범위에서 180°일 때와 0°일 때가 가장 크다. 최종적으로, inner space와 outer space가 180°의 위상차가 있는 Möbius Strip을 원주를 따라 잘랐을 때, 가장 원주의 길이가 긴 스트립을 만들 수 있음을 쉽게 예측할 수 있다.

또한 기존의 변형된 Möbius Strip은 Möbius

Strip의 특성을 활용하여 소형화에 성공하였으나, 완벽한 평판형 Möbius Strip이 아닌 구조로 인한 여러 가지 문제점이 있었다<sup>4,5)</sup>. Fig. 2에서와 같이 두 개의 링이 연결된 부분에서의 3차원의 연결 브리지(bridge)는 선로결합효과(coupling effect) 현상의 원인이 되어 단일 공진주파수 특성을 갖는 RF회로에 적용시키는 것에 적합하지 않았다.

또한 기존에 제안된 변형된 평판형 Möbius Strip은 완벽한 2차원의 구조가 아닌, 3차원 구조로 MMIC등의 집적화된 회로에 적용하는 것에 한계가 있었다.

따라서 본 논문에서는 기존 Möbius Strip의 문제점을 해결한 완벽한 2차원 구조의 Quasi Möbius Strip와 via hole구조를 제시함으로써 선로결합효과의 문제를 해결하고, 집적화된 RF회로에 완벽하게 적용할 수 있는 소형화된 구조를 제시한다.

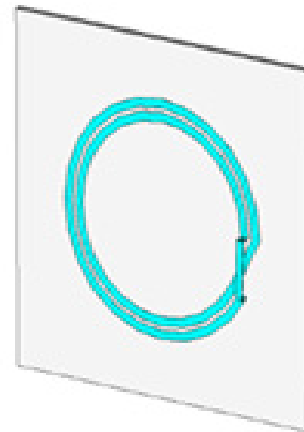


그림 2. 원주를 따라 두 개로 잘려진 평판형 피비우스 스트립의 측면도

Fig. 2. Perspective configuration of the planar Möbius Strip bisected along the circumferential directions

## II. 본 론

### 2.1. 본 논문에 제안된 Quasi Möbius Strip

Möbius Strip의 동일한 물리적 길이를 유지하면서 원주를 따라 자르는 횟수(N)를 증가시키면, 소형화 될 수 있다는 것을 기대할 수 있다. 이러한 절차를 이용하여, 원주를 따라 잘라진 Möbius Strip의 전체 원주의 길이는 일반적인 Möbius Strip의 원주의 길이의 2배다. 원주를 따라 잘려진 Quasi Möbius Strip을 RF회로 설계 시 적용하면, 공진주파수는 유지하면서 전체 원주 길이의 소형화가 기

대된다.

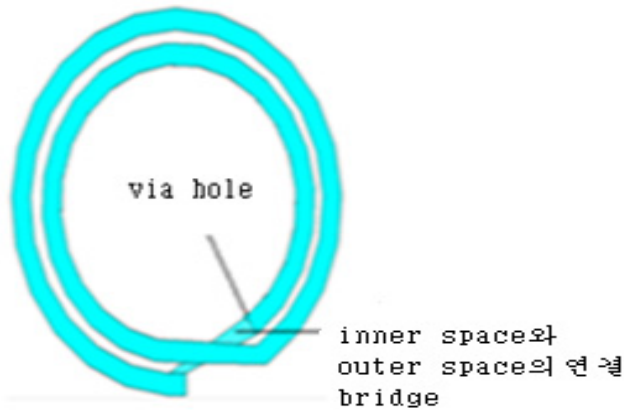


그림 3. Quasi Möbius Strip의 정면도  
Fig. 3. Top view of the Quasi Möbius Strip

Fig. 3은 본 논문에서 제안하는 Quasi Möbius Strip의 정면도이다. 두개의 링이 교차되어 연결되어 있다. 또한, 두개의 링이 교차되는 inner space와 outer space의 연결 bridge를 기관의 앞면과 뒷면으로 물리적으로 분리한 뒤, via hole로 연결하여 페비우스 스트립의 특성인 open space이면서 Möbius Strip과 동위상인 Quasi Möbius Strip을 구현하였다.

Fig. 4은 기관위의 Quasi Möbius Strip의 후면도이다. 본 논문에서 제안된 Quasi Möbius strip과 via hole구조를 적용시키면 저주파수에서의 전자과 간섭현상 및 동일공진주파수에서의 RF회로가 소형화 될수록 심각하게 발생할 수 있는 선로 결합효과 (coupling effect) 현상을 완화시킬 수 있는 장점이 있다.

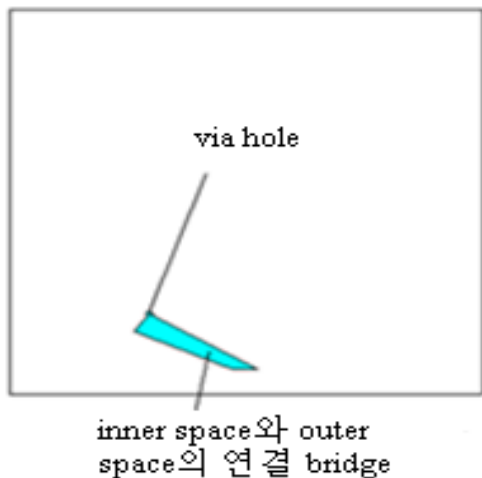


그림 4. Quasi Möbius strip의 후면도  
Fig. 4. Back view of the Quasi Möbius strip

## 2.2. Möbius Strip과 논문에 제안된 Quasi-Möbius strip의 위상동형의 증명

Möbius Strip과 제안된 Quasi-Möbius Strip의 위상(topology)이 같다는 것을 증명하기 위하여 오일러의 표수 공식을 적용하기로 한다. 오일러의 표수가 같으면 두 도형의 위상이 같다는 것이 증명된다. 오일러의 표수는 다음과 같이 정의된다<sup>6)</sup>.

$$\chi = \nu - e + f \tag{11}$$

$\nu$ =다면체의 꼭지점의 수,  
 $e$ =모서리의 수,  
 $f$ =면의 수

Möbius strip의 오일러 표수는 다음과 같다.

$$\chi = \nu - e + f = 0 - 1 + 1 = 0 \tag{12}$$

본 논문에서 제안된 Quasi-Möbius strip의 오일러 표수는 다음과 같다.

$$\chi = \nu - e + f = 7n - (8n) + n = 0 \quad (N = n \text{일 때}) \tag{13}$$

그러므로 Möbius strip과 본 논문에서 제안된 Quasi-Möbius strip의 오일러 표수는 같다. 따라서 Möbius strip과 본 논문에서 제안된 Quasi-Möbius strip은 위상동형이다.

## 2.3. Quasi Möbius Strip을 적용한 소형화 과정

본 논문에서 제안하는 Quasi-Möbius strip은 다음과 같이 유도된다.

$N$ =even number 라면,

$$M(t,s) = [R + s \cdot \cos(\frac{1}{2}t)] \cdot \cos(t),$$

$$\text{for } 0 \leq t \leq \pi, \dots, 2N\pi \leq t \leq (2N+1)\pi \tag{14}$$

$$M(t,s) = [R + s \cdot \cos(\frac{1}{2}t)] \cdot \sin(t + N \times \frac{1}{2}\pi),$$

$$\text{for } \pi < t \leq 2\pi, \dots, (2N+1)\pi < t \leq 2(N+1)\pi \tag{15}$$

where  $s \in [-\omega, \omega]$ ,  $t \in [0, 2(N+1)\pi]$ ,

$R$ =Radius of the Quasi Möbius Strip,

$N$ =Number of cuts of the Quasi Möbius Strip

$N$ =odd number 라면,

$$M(t,s) = [R+s \cdot \cos(\frac{1}{2}t)] \cdot \cos(t),$$

$$\text{for } 0 \leq t \leq \pi, \dots, 2N\pi \leq t \leq (2N+1)\pi$$

(16)

$$M(t,s) = [R+s \cdot \cos(\frac{1}{2}t)] \cdot \sin(t+(N+1) \times \frac{1}{2}\pi),$$

$$\text{for } \pi \leq t \leq 2\pi, \dots, (2N+1)\pi \leq t \leq 2(N+1)\pi$$

(17)

where  $s \in [-\omega, \omega]$ ,  $t \in [0, 2(N+1)\pi]$ ,

R=Radius of the Quasi Möbius Strip,

N=Number of cuts of the Quasi Möbius Strip

N=3일 때, Quasi-Möbius strip의 함수는 다음과 같이 유도된다.

$$M(t,s) = [R+s \cdot \cos(\frac{1}{2}t)] \cdot \cos(t),$$

$$\text{for } 0 \leq t \leq \pi, \dots, 6\pi \leq t \leq 7\pi$$

(18)

$$M(t,s) = [R+s \cdot \cos(\frac{1}{2}t)] \cdot \sin(t+(N+1) \times \frac{1}{2}\pi),$$

$$\text{for } \pi < t \leq 2\pi, \dots, 7\pi \leq t \leq 8\pi$$

(19)

where  $s \in [-\omega, \omega]$ ,  $t \in [0, 2(N+1)\pi]$ ,

R=Radius of the Quasi Möbius Strip,

N=Number of cuts of the Quasi Möbius Strip

Quasi-Möbius strip의 원주를 따라 자르는 회수 (N)을 증가시키면, 전체 원주의 길이가 (N+1)배 만큼 증가함을 예측할 수 있다. 따라서 동일 공진주파수라는 조건 하에서 Quasi-Möbius strip의 N을 증가시키면, 소형화가 가능하다. 그러므로 본 논문에서 제안한 N을 증가시킨 Quasi Möbius Strip을 RF 회로 설계 시 적용시키면 동일 공진주파수에서의 소형화 회로 및 시스템 설계가 가능하다.

#### 2.4. 안테나 설계에의 응용

전자파 간섭효과(Coupling Effect)를 최소화하기 위하여 Fig.5와 Fig.6에서 inner space와 outer space의 연결 bridge를 기판의 뒷면에 배치하고 via-hole로 앞면과 연결하였다. 또한, 선로 결합효과를 완화하기 위하여 inner space와 outer space의 떨어진 거리를 최적화시켰다. 본 논문에 제안된 Quasi Möbius Strip을 적용한 안테나의 공진주파수는 2.4GHz이다.

N=n일 때, 공진주파수 f의 안테나 반지름 r은 다음과 같다.

$$f = \frac{c}{\lambda \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c}{(n+1) \times 2\pi \times r \times \sqrt{\epsilon_r}}$$

$$\therefore f \times (n+1) \times 2\pi \times r = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{2.2}}$$

$$\therefore r = \frac{3 \times 10^8}{f \times (n+1) \times 2\pi \times \sqrt{2.2}} (mm) \quad (20)$$

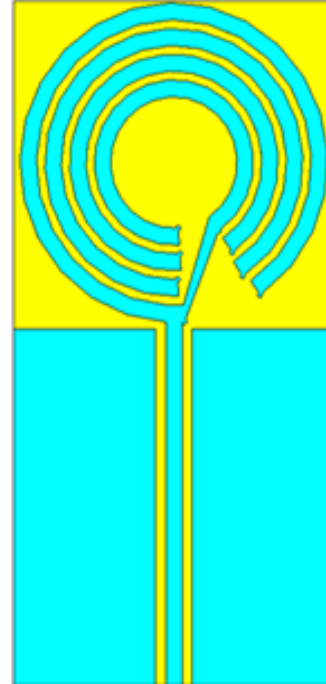


그림 5. Quasi Möbius Strip Antenna의 정면도  
Fig .5. Top view of the Quasi Möbius Strip Antenna



그림 6. Quasi Möbius Strip Antenna의 후면도  
Fig. 6. Back View of the Quasi Möbius Strip Antenna

### III. 시뮬레이션 결과

Fig.7은 N=2일 때의 2.4GHz의 공진용 안테나의 리턴로스( $S_{11}$ )을 simulation한 결과이다. 2.4GHz대역에서 정확하게 공진하고 있으며, 리턴로스( $S_{11}$ )이 약 19dB까지 침예하게 떨어진다.

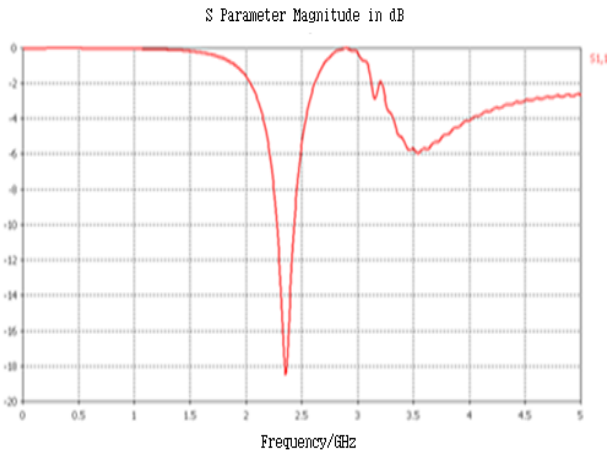


그림 7. 시뮬레이션 된 반사계수(N=2)  
Fig. 7. Simulated Return Loss(N=2)

시뮬레이션 결과에서 제시하는 것처럼, 공진주파수의 인접주파수에서의 심각한 선로결합효과(coupling effect) 현상이 발생하지 않았다. 또한, 기존의 Möbius Strip 안테나에 비하여 공진침예도(Quality Factor)가 향상되었다. 본 논문의 시뮬레이션 결과에 의하면, 2.4GHz의 공진주파수 일 때, 기존의 링 안테나와 대비하여 물리적 원주의 길이는 1/3배로 소형화 되었으며, 2.4GHz의 공진주파수 근처에서 선로결합 효과 현상이 거의 발생하지 않았다.

### IV. 결 론

본 논문에서는 전자과간섭현상을 최소화시킨 Quasi Möbius strip과 via hole구조를 제시하고 Möbius strip과의 위상동형을 증명하였다. 본 논문의 시뮬레이션 결과에 의하면, 2.4GHz의 공진주파수 일 때, 기존의 링 안테나와 대비하여 물리적 원주의 길이는 1/3배로 소형화 되었다. 또한, 기존의 헤리컬 안테나가 한 번의 원주의 회전이 있을 때마다 공진주파수가 발생했지만, 본 논문에서 제시한 Quasi Möbius Strip과 via hole을 적용한 안테나는 2.4GHz의 공진주파수만을 발생시킨다. 또한, 2.4GHz의 공진주파수 근처에서 선로결합 효과 현

상이 기존 논문<sup>[4,5]</sup>에 비하여 완화되었다. 본 논문에서 제시된 Quasi Möbius strip은 RF회로의 소형화 설계 및 선로 결합효과 완화에 적용될 것으로 기대된다. 향후 연구과제로는 via hole의 위치 및 크기에 따른 등가회로 및 매칭 네트워크의 연구가 필요하다.

### References

- [1] Mariam Webster, *Webster's New Collegiate Dictionary*, G.&C. Merriam, 1974.
- [2] J. M. Pond, "Möbius dual mode resonators and bandpass filters," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2465-2471, Dec. 2000.
- [3] J. M. Pond, S. Liu, and N. Newman, "Bandpass filters using dual-mode and quad-mode Möbius resonators," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 29, no. 12, pp. 2363-2368, Dec. 2001.
- [4] M. J. Kim, C. S. Cho, and J. Kim, "Miniaturized antenna using a planar Möbius strip bisected along the circumferential direction," in *Proc. European Microw. Conf.*, pp.827-830, Manchester, U.K., Oct. 2006.
- [5] M. J. Kim, C. S. Cho, and J. Kim, "Miniaturized resonator using a planar Möbius strip bisected along the circumferential direction," in *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, pp. 1385-1388, San Francisco, U.S.A., June 2006.
- [6] E. Early, "On the Euler characteristic." *MIT Undergraduate J. Math.*, vol. 1, no. 1, pp. 37-47, June 1999.

김 미 정 (Mi Jung Kim)



1996년 2월 한국항공대학교  
항공통신정보공학과 공학사  
2000년 8월 한국기술교육대학  
교 정보통신공학과 공학석사  
2007년 2월 한국항공대학교 정  
보통신공학과 박사수료  
2008년 2월<sup>o</sup>현재 공주대학교

정보통신공학부 박사과정

<관심분야> 전자장 수치해석 및 안테나 설계, 네트  
워크 보안

박 성 균 (Seong Gyoon Park)



1985년 2월 연세대학교 전자공  
학과 (공학사)  
1987년 2월 연세대학교 전자공  
학과 (공학석사)  
1987년 4월~1989년 8월 삼성  
전자 연구원  
1994년 2월 연세대학교 전자공

학과 (공학박사)

1993년 11월<sup>o</sup>1994년 8월 ETRI 위촉연구원 및 Post  
Doc.

1994.9~현재 공주대학교 정보통신공학부 교수

<관심분야> 무선통신시스템, 전파신호처리, 스펙트  
럼공학

노 승 환 (Soong Hwan Ro)



1987년 8월 고려대학교 전자공  
학과 공학사  
1989년 8월 고려대학교 전자공  
학과 공학석사  
1993년 2월 고려대학교 전자공  
학과 공학박사  
1997년 한국전자통신연구원 초  
빙연구원

2003년 영국버밍엄 대학교 초빙연구원

1994~현재 국립 공주대학교 정보통신공학부 교수

<관심분야> 이동통신, pervasive 컴퓨팅, 임베디드  
시스템.