

원형 링슬롯 안테나의 광대역 메커니즘 연구

°신호섭*, 김 남*

*충북대학교 정보통신공학과 전파통신연구실

Study on the wideband mechanism of a circular ring slot antenna

°Hosub Shin*, Nam Kim*

*Dept. of Computer & Communication Eng., Chungbuk Nat'l Univ.

ABSTRACT

본 논문에서는 광대역 원형 링슬롯 안테나의 광대역 특성이 일어나는 메커니즘 연구를 통해 새로운 광대역 안테나 설계 및 분석에 도움을 줄 수 있도록 하였다. 먼저 기존의 광대역 안테나 및 공진회로 개념을 이용하여 새로운 광대역 안테나의 이론적인 분석을 하도록 하였으며, 기존의 광대역 안테나를 설계하는 방법(자기유사구조, 자기상보구조, 길이보다 각을 강조한 구조, 두꺼운 도체를 사용하는 구조 등)외에 최근들어 많이 연구되고 있는 안테나의 Q값을 줄이는 방법에 대해 분석 및 정리하고 본 원형 링슬롯 안테나의 복사기과 급전선사이에서 광대역이 일어나는 메커니즘에 대해서 연구하였다.

Key words : wideband antenna, resonant circuit, microstrip antenna, antenna theory, ring slot

1. 서 론

최근에 와서 언제 어디서나 대용량의 정보를 교환할 수 있는 무선 통신 장비의 개발을 위해 광대역 안테나의 개발이 필수적으로 필요해지고 있다. 실제로 UWB(Ultra WideBand) 시스템과 SDR(Software Defined Radio) 기술 등이 많이 필요해 지게 됨에 따라 광대역 안테나의 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 또한 통신장비가 점점 휴대가능할 수 있게 됨에 따라 소형, 경량, 박형의 특징을 가지는 마이크로스트립 안테나에 대한 연구가 활발해지고 있다. 하지만 마이크로스트립 안테나는 대역폭이 좁아서 실제로 적용하기에는 어려운 단점을 가지고 있어서 대역폭을 개선하기 위해 여러 가지 방법들이 연구되고 있다^[1]. 이러한 단점을 극복하기 위해서 기관의 두께를 증가시키는 방법, 다층 기관을 사용하는 방법, 대수 주기 배열 방법, 동일 평면상에 여러개의 패치를 중복적으로 겹치는 방법, 기생소자가 용량성 결합으로 부가된 안테나를 사용하는 방법, 개구 결합 마이크로스트립 안테나를 이용하는 방법^[2,3] 등 다양한 방법이 연구되고 있지만 안테나의 크기가 커진다는 문제점이 있으므로 안테나의 구조자체를 변화시켜서 대역폭을 넓히는 방법들이 제시되고 있다.

본 논문에서는 광대역안테나를 효율적으로 설계하기 위해 광대역이 일어나는 메커니즘에 대해 광대역 안테나이론을 도입하여 체계적으로 분석·정리하였다. 기존의 광대역 안테나를 설계하는 방법(자기유사구조, 자기상보구조, 길이보다 각을 강조한 구조, 두꺼운 도체를 사용하는 구조 등)외에 최근들어 많이 연구되고 있는 안테나의 Q값을 줄이는 방법에 대해 분석 및 정리하고 원형 링슬롯 안테나^[4,5]의 복사기과 급전선사이에서 광대역이 일어나는 메커니즘을 알아보기 위해 링슬롯의 공진주파수, 급전선의 특성임피던스와 링슬롯의 복사저항을 계산하였다.

2. 기존의 광대역 안테나의 설계방법

2-1. 자기유사(self-similar)구조

안테나의 치수를 일정하게 확대하거나 축소하여도 즉, 안테나 길이의 변화에 따라 각각의 주파수는 달라도 입력임피던스는 변화하지 않는 안테나 즉, 자기자신이 서로 닮은 안테나이다. 그림 1 (a), (b)에서 기하학적 치수의 비이므로 관계식은 다음과 같다.

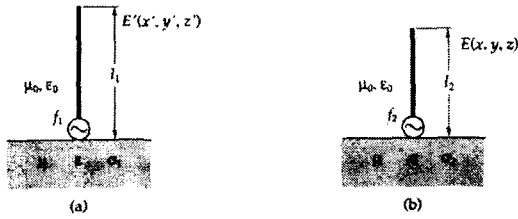


그림 1. 자기유사 안테나

$$Z \cdot Z = \frac{\eta_0 \cdot \eta_0}{4} \quad (3)$$

η_0 : 자유공간의 특성임피던스(=120 π)

이 성립하며, 따라서 임피던스 Z는

$$Z = \frac{\eta_0}{2} = 60\pi[\Omega] \quad (4)$$

가 된다. 즉 자기상보 안테나의 입력임피던스는 안테나의 모양과 주파수에 관계없이 항상 일정하며 약 60 π [Ω]이 된다.

2-3. 길이보다 각을 강조한 구조

헬리컬 안테나나 등각 스파이럴 안테나가 이 구조의 예로써 고정된 물리적인 길이를 피하고 일정한 각을 유지해서 각의 의존을 최대화함으로써 반사파를 최소로 줄임에 따라 초광대역 특성을 가지게 된다. 또한 원추형 안테나나 보우타이 안테나도 이 예라고 할 수 있다.

2-4. 두꺼운 도체를 사용하는 구조

다이폴 안테나와 같은 짝 공진형(even resonant) 안테나의 도선 직경을 증가시키면 대역폭이 증가한다. 쌍원추형 안테나는 극단적으로 두꺼운 다이폴이며 넓은 대역폭을 가진다. 보우타이 안테나도 또한 극단적으로 두꺼운 다이폴 안테나의 예이다.

3. RLC 공진회로의 Q와 대역폭의 관계식 유도

3-1. RLC 직렬 공진회로

안테나가 어떻게 동작하고 정합되는지 알기 위해 안테나의 등가회로가 필요하고 안테나도 하나의 RLC 공진회로로 근사화가 가능하다. 직렬공진회로도 는 그림 3과 같다.

공진은 전달되는 Complex Power가 최소가 될 때 발생한다. 특성을 나타내는 중요한 파라미터는 공진 주파수(ω_0)와 Q값이다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5)$$

$$Q = \omega \frac{\text{Average Stored Energy}}{\text{Power Loss}} \quad (6)$$

$$= \omega \frac{W_m + W_e}{P_{loss}}$$

$$= \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC}$$

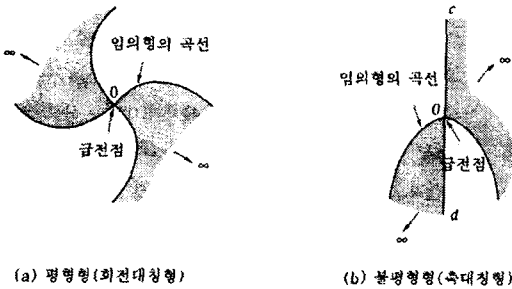


그림 2. 자기상보 안테나

$$f_1 l_1 = f_2 l_2 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_1}{f_1} = \frac{\sigma_2}{f_2} \quad (2)$$

특별한 경우로서 두 안테나계가 자유공간($\sigma=0$)에 있거나 완전도체($\sigma=\infty$)로 접지된 경우, 조건식 (2)은 불필요하고 조건식 (1)만 성립하면 된다. 즉 모든 안테나 길이의 치수가 주파수에 반비례하면 두 전자계는 유사이다. 이 경우는 길이 변화에 따라 각각의 주파수는 달라도 입력임피던스는 일정하므로 광대역 특성을 갖게 된다.

2-2 자기상보(self-complementary) 안테나

임의의 형태의 무한히 넓은 평면도체판으로 구성된 판의 부분과 빈 공간 부분과의 형태가 같다고 할 때, 도체판을 빈공간까지 회전시키면 서로 포개지는 안테나이다. 그림 2 (a)는 임의의 곡선을 차례로 90° 씩 회전시킴으로써 만들어지는 평형형(회전대칭형) 자기상보 안테나이고, 그림 2 (b)는 안테나를 구성하는 곡선이 직선 cd에 대하여 대칭인 것으로 불평형형(축대칭형) 자기상보 안테나이다.

이와 같은 안테나의 급전점 O에서 본 임피던스를 Z라 하면, 이것과 상보인 안테나의 임피던스도 똑같이 Z가 된다고 볼 수 있으므로

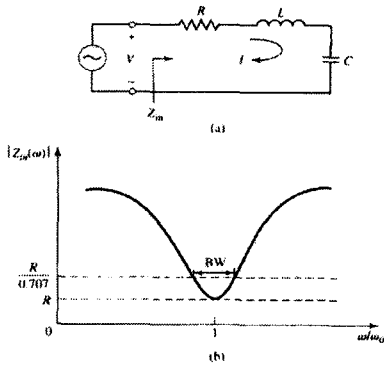


그림 3. RLC 직렬 공진회로

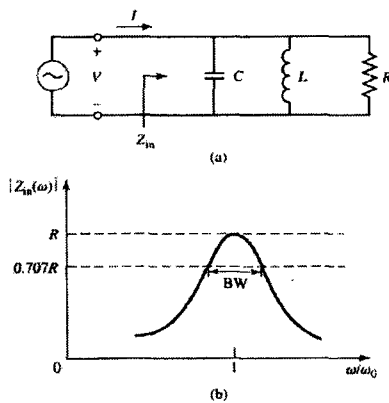


그림 4. RLC 병렬 공진회로

또한, Q값과 3 dB 대역폭과의 관계를 알아보자. 그림 3 (b)에서 $|Z_{in}|^2=2R^2$ 일 때, 공진회로에 전달되는 평균전력이 공진의 경우보다 3 dB 떨어지게 된다. 먼저, 입력저항을 $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ 에서 Q값을 이용하여 나타내면

$$\begin{aligned} Z_{in} &= R + j\omega L \left(1 - \frac{1}{\omega^2 LC}\right) \\ &= R + j\omega L \left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega^2}\right) \\ &\cong R + j2L\Delta\omega \\ &= R + j\frac{2RQ\Delta\omega}{\omega_0} \end{aligned} \tag{7}$$

$$BW = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$$

$$|R + jRQ(BW)|^2 = 2R^2$$

$$\therefore BW = \frac{1}{Q} \tag{8}$$

따라서, Q값이 높으면 손실이 적고 공진이 잘되며 BW가 좁다. 그리고 Q값이 적으면 손실이 많고

공진이 잘 안되며 BW가 넓다.

3-2. RLC 병렬 공진회로

RLC 병렬 공진회로는 RLC 직렬 공진회로와 쌍관계(dual)에 있다.

$$\begin{aligned} Z_{in} &= \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C\right)^{-1} \\ &\cong \left(\frac{1}{R} + \frac{1 - \Delta\omega/\omega_0}{j\omega_0^2 L} + j\omega_0 C + j\Delta\omega C\right)^{-1} \\ &\cong \left(\frac{1}{R} + 2j\Delta\omega C\right)^{-1} \\ &\cong \frac{R}{1 + 2j\Delta\omega RC} = \frac{R}{1 + 2jQ\Delta\omega/\omega_0} \end{aligned} \tag{9}$$

그림 4 (b)에서 $|Z_{in}|^2 = \frac{R^2}{2}$ 일 때, 3 dB대역폭의 가장자리 주파수에 걸치게 됨에 따라 공진회로에 전달되는 평균전력이 반으로 떨어진다. 따라서

$$\begin{aligned} |Z_{in}|^2 &= \frac{R^2}{1 + 4Q^2(\Delta\omega/\omega_0)^2} \\ 4Q^2(\Delta\omega/\omega_0)^2 &= 1 \\ Q^2(2\Delta\omega/\omega_0)^2 &= 1 \\ Q^2 BW^2 &= 1 \\ \therefore BW &= \frac{1}{Q} \end{aligned} \tag{10}$$

RLC 병렬공진회로도 RLC 직렬공진회로와 마찬가지로 Q값이 적으면 손실이 많고 공진이 잘 안되며 BW가 넓다.

RLC 병렬 공진회로에서 Q값은 다음과 같다.

$$Q = \omega_0 \frac{2W_m}{P_{loss}} = \frac{R}{\omega_0 L} = \omega_0 RC \tag{11}$$

3-3. 광대역 안테나의 설계방안

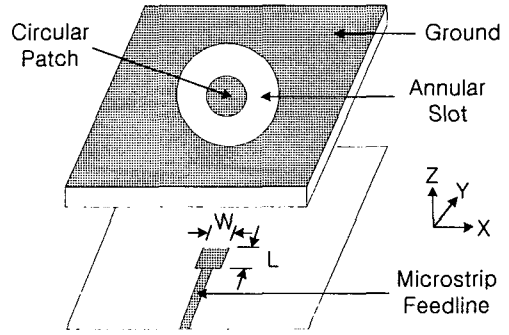
실제의 안테나의 등가회로는 RLC직렬공진회로와 병렬공진회로의 조합으로 나타난다. 광대역 안테나를 설계하기 위해서는 대역폭이 Q값의 역수가 되므로 Q값을 낮추는 방안이 강구되어야 한다.

4. 광대역 원형 링슬롯 안테나

4-1. 구조, 시뮬레이션 및 실험결과

광대역 원형 링슬롯 안테나의 구조도는 그림 5와 같다. 동심원을 갖는 링슬롯 복사구조와 저임피던스 급전구조^[2]를 가지는 안테나로 설계하였다. 그림 6는 최적화된 안테나의 반사손실의 계산치와 측정치를

비교하여 나타낸 것이다. -10 dB를 기준으로 최저주파수와 최고주파수가 거의 일치함을 알 수 있다. 공진주파수의 차이가 좀 있는데 이는 RF의 특성상 미세한 구조의 차이가 생겨도 특성이 변하는 점과 설계치를 따르는 정확한 안테나의 제작이 어려운 점으로 인해 생겨나는 것으로 생각된다. 표 1은 최적화된 안테나의 계산치와 측정치의 주파수 구간과 대역폭 결과를 나타내었다.



4-2. 공진주파수의 계산

원형 패치에 비해 링슬롯은 에너지를 덜 저장시키므로 식 (12)에 의해 더 적은 Q값을 가진다.

$$Q = w \frac{W_m + W_e}{P_t} \quad (12)$$

따라서 식 (13)에 의해 광대역 대역폭 특성을 가지게 되는 것이다.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q_t} \quad (13)$$

이식들에서 W_m 은 인덕터 성분에 저장된 평균 자계 에너지이고 W_e 는 커패시터 성분에 저장된 평균 전계 에너지이며, P_t 은 공진회로의 손실이다. 또한 Δf 는 대역폭이고 f_0 는 공진주파수이며, Q_t 는 안테나의 total quality factor이다.

본 동심원 구조를 갖는 원형 링슬롯 안테나의 n차 모드(1회전에 n사이클 변화, $kr=n$)의 공진주파수는 다음과 같다.

$$f_r = \frac{nc}{\pi \sqrt{\epsilon_{eff}} (R_o + R_i)} \quad (14)$$

여기서 $\epsilon_{eff} = \left(\frac{\lambda_0}{\pi(R_i + R_o)} \right)^2$ 는 실효 유전상수이고 c는 빛의 속도이며, R_o 와 R_i 는 각각 링의 밖과 안의 반지름이다.

$kr=1$ (TM_{11} mode, 1차모드)일 때 공진주파수를 계산하여 보자. 여기서 $r = \frac{R_o + R_i}{2}$ 는 원형 링슬롯의 내부반경과 외부반경의 평균치이고, k는 파수이다.

이 경우 원형 링슬롯을 따라 1회전시 1사이클이 변화하므로 2π 라디안의 위상이 변화한다. 1차모드의 공진주파수를 구해보자.

$$r = \frac{1}{k} = \frac{1}{\omega \sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{1}{2\pi f \sqrt{\mu \epsilon}} \quad (15)$$

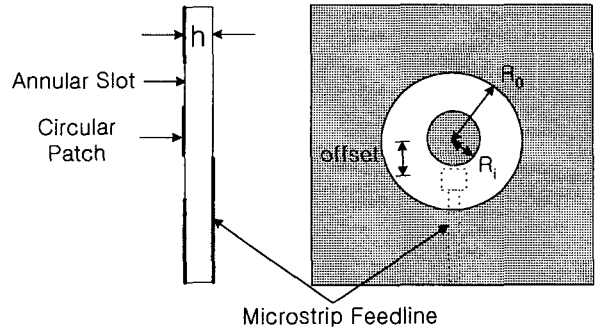


그림 5. 동심원 복사구조와 저임피던스 급전구조를 갖는 원형 링슬롯 안테나의 구조도

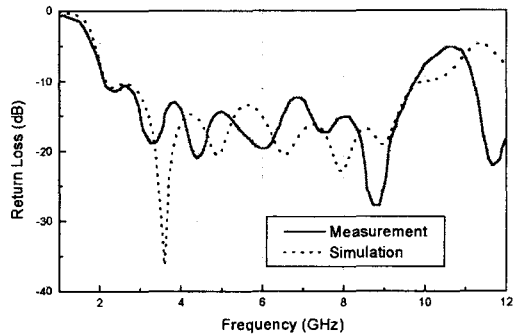


그림 6. 최적화된 안테나의 계산치와 측정치의 비교 ($R_o = 26$ mm, $R_i = 10$ mm, $L = 12$ mm, $W = 10.5$ mm, offset = 18.34 mm)

표 1. 최적화된 안테나의 계산치와 측정치의 비교

	주파수 구간 (GHz)	대역폭	
		GHz	%
Simulation	2.2 ~ 9.8	7.6	126.7
Measurement	2.17 ~ 9.76	7.59	127.2

$$f_r = \frac{1}{2\pi r \sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{c}{2\pi \sqrt{\mu_r \epsilon_r} (R_o + R_i)} \quad (16)$$

그러므로, 본 안테나의 1차모드의 공진주파수는 1.28 GHz가 된다.

4-3. 급전선로의 특성임피던스와 링슬롯의 복사 저항 계산

저임피던스 급전선의 임피던스를 그림 7에 나타내었으며, 그림 8에 링슬롯과 링패치의 구조가 상보관계에 있음을 보여주고 있으며, Babinet의 원리로부터 두 구조의 임피던스에 관한 관계식을 식 (17)에 나타내었다.

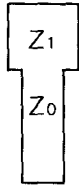


그림 7. 저임피던스 급전선의 특성임피던스 $Z_0(=50[\Omega])$ 와 $Z_1(=14.3[\Omega])$

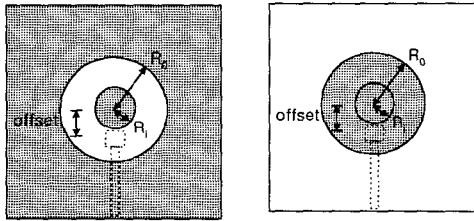


그림 8. 링슬롯과 링패치의 구조

$$Z_{slot}Z_{patch} = \frac{Z_0^2}{4} \frac{1}{\epsilon_e} \quad (17)$$

링슬롯의 복사저항 계산식^[6]은 다음과 같다.

$$R_{slot} = \frac{180\epsilon_e}{1 - \frac{1}{5\epsilon_e} + \frac{1}{28\epsilon_e^2} - \frac{1}{180\epsilon_e^3} + \frac{1}{1320\epsilon_e^4} - \dots} \quad (18)$$

(16)식에서 구한 공진주파수 1.28 GHz를 이용하여 링슬롯의 복사저항을 구해보자.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} = 234.375 \text{ mm}$$

$$\epsilon_e = \left(\frac{234.375}{\pi(26+10)} \right)^2 = 4.2946$$

따라서, 링슬롯의 복사저항은 809[Ω]으로 계산된다.

또한, 측정치에서 구한 반사손실이 -10 dB이하로 떨어지는 최저주파수인 2.2 GHz를 이용해서 링슬롯의 복사저항을 구해보면 다음과 같다.

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} = 136.364 \text{ mm}$$

$$\epsilon_e = \left(\frac{136.364}{\pi(26+10)} \right)^2 = 1.454$$

이 경우 링슬롯의 복사저항은 289[Ω]으로 계산된다.

5. 결론

본 논문에서는 광대역 안테나의 기존의 설계방법과 Q값을 줄이는 방법을 체계적으로 정리하여 설명하였고, 그 예로써 원형 링슬롯 안테나의 Q값과 대역폭과의 관계를 제시하였으며, 원형 링슬롯 안테나의 공진주파수와 급전선로의 특성임피던스와 원형 링슬롯의 복사저항을 계산하였다. 추후 본 안테나의 손실저항과 효율을 계산해서 이들 파라미터들이 광대역 안테나의 대역폭 특성에 미치는 영향도 연구해서 안테나의 급전선로와 복사기의 광대역 매커니즘에 대해 보다 면밀히 분석할 예정이다.

참고 문헌

[1] S. H. David, "A survey of broadband microstrip patch antennas", *Microwave J.*, pp. 60-84, Sep., 1996.
 [2] S. D. Targonski, R. B. Waterhouse, and D. M. Pozar, "Design of wide-band aperture-stacked patch microstrip antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, no. 9, pp. 1245-1251, Sep. 1998.
 [3] H. S. Shin and N. Kim, "A wideband and high-gain one-patch microstrip antenna coupled with an H-shaped aperture", *Electronics Letters*, vol. 38, no. 19, pp. 1072-1073, Sep. 2002.
 [4] 서영훈, 박익모, "광대역 특성을 갖는 변형된 원형 링 마이크로스트립 슬롯 안테나", 한국전자파학회 논문지 제 11권 제 5호, pp. 773-781, 2000년 8월.
 [5] 신호섭, 김 남, "동심원 복사구조를 갖는 광대역 원형 링슬롯 마이크로스트립 안테나", 춘계 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 제 25권 제 1호, pp. 161-164, 2002년 5월.
 [6] G. Dubost, "Theoretical radiation resistance of an isolated slot ring resonator", *Electronics Letters*, vol. 23, no. 18, pp. 928-930, Aug. 1987.