

I. 서론

이동통신 기술의 급속한 발전과 함께 무선 통신 기기들은 소형화되고 있으며, 이에 따른 안테나의 소형화와 박형화의 요구는 필연적이라고 할 수 있다. 소형 안테나는 소형이면서 무게가 가벼운 안테나를 필요로 하는 비행체나 이동체 또는 휴대용 무선기 등에서 강력하게 요구되어 왔다. 따라서, 미국에서는 미사일이나 항공기에 사용하는 군과 로켓트나 위성에 사용하는 NASA에서 많은 연구가 이루어져 왔다. 최근의 민수용 이동 통신기기 및 휴대용 전화기는 외장형의 소형 안테나 뿐만 아니라 내장형의 안테나(intenna)에 관한 연구가 중요한 과제로 되어 있다.

안테나를 소형화 또는 박형화 하게 되면 안테나의 방사효율이 저하함과 동시에 주파수 대역폭도 좁아지는 것이 일반적이다. 이러한 특성 열화를 방지하기 위한 안테나의 소형화 기술은 중요한 연구 과제로 되어 있다. 안테나를 소형화 하면 방사효율이 낮아지므로 소형 안테나의 개발에서는 기본적으로 방사효율을 측정하여 안테나의 성능을 평가하여야 한다. 따라서, 방사효율의 측정은 소형 안테나의 연구개발에서 중요한 부분을 차지한다. 방사효율 측정법으로는 방사패턴 적분법, Wheeler cap 법, Q-factor법, 반사계수법, 랜덤필드법 등이 보고되어 있다.

본 고에서는 소형 안테나의 평가파라미터 중에서 중요한 방사효율의 측정법에 관하여 설명하였다.

II. 소형 안테나의 문제점

전기적 소형 안테나에서 특히 고려해야 하는 특성은 안테나의 방사효율 또는 이득, 대역폭, 그리고 잡음온도 또는 S/N비 등이다. 안테나의 크기가 사용 파장에 비교하여 작아지면(전기적 소형 안테나, 이후 소형 안테나라 함) 방사효율이 저하하고 대역폭이 좁아진다는 것은 주지의 사실이다.

안테나는 과연 어디까지 소형화 할 수 있을까? 좀더 구체적으로 말한다면 안테나를 작게 하고 싶은데 어떤 형태의 소자를 사용하면 좋은가? 이 질문은 전기적 소형 안테나의 한계론에 관한 것으로 귀착된다. 소형 안테나의 물리적 한계에 관해서는 1947년경 Wheeler^[1]와 Chu^[2]의 연구 결과가 보고되어 있으며, 소형 안테나가 얻어질 수 있는 특성의 한계에 대한 조건이 검토되어져 개념적인 이해는 얻어진 상태이다. 그러나, 소형 안테나에 관한 체계적으로 확립된 일반성 있는 이론은 아직까지 없다는 것이 안테나 학계의 정설로 되어 있다. 안테나의 크기가 사용 파장에 비교하여 작아지면 안테나의 Q가 커지므로 대역폭은 급격히 좁아진다. 따라서, 이득과 대역폭을 동시에 증가시키는 것은 본질적으로 불가능하다. 안테나의 소형화를 위해서는 평가 파라미터의 적절한 타협(trade off)을 생각하지 않으면 안 된다. 경우에 따라서는 협대역을 요구하는 경우도 있는데, 이 경우에는 방사효율만 생각하면 된다. 특히 이동 통신기기 등에서는 이러한 경우가 많다. 안테나가 소형이 될수록 방사효율을 높이기 어렵지만, 안테나 및 정합회로와 손실 보상분 만큼은 효율

을 높이기 위한 여지가 남겨져 있다고 할 수 있다.

방사효율은 특히 송신인 경우에 중요하다. 수신인 경우에는 오히려 S/N 비가 문제가 되며 반드시 효율이 높아야 할 필요는 없다. 수신에서는 손실에 바탕을 둔 안테나 잡음이 외부잡음보다 작고, 수신 신호가 수신기의 내부잡음보다 높은 레벨이라면 안테나의 효율이 낮아도 실용상에는 큰 문제가 되지 않기 때문이다.

소형 안테나의 사용상에 관한 문제점으로서 중요한 것은 주위 환경조건의 변화에 따른 영향이다. 휴대용 무선기가 가장 좋은 예인데 VHF 대역의 수신에서는 경험적으로 10~20 dB 정도의 손실이 있다고 알려져 있다. 이러한 환경조건에서는 안테나가 이동함에 따라 안테나를 포함하는 전체적인 안테나계의 변화가 안테나 특성변화의 예측과 정량화를 더욱 어렵게 만들고 있다^{[3],[4]}.

무선 이동통신 시대를 맞이한 현재는 안테나의 소형화 기술이 필연적으로 요구되고 있다. 그러나, 안테나의 형상이 목적별로 아직 확립되어 있지 않는 상황에서 소형 안테나의 설계지침을 확립하기란 매우 어렵다. 소형 안테나에서 가장 대표적인 전기적 소형 안테나에 한정하여 설계지침을 생각해 보자. 일반적으로 안테나를 소형화하면 입력 임피던스는 낮은 저항에다 큰 용량성 리액턴스로 된다. 정합회로를 이용하여 리액턴스를 소거하면 이번에는 협대역이 되어 버린다. 이 뿐만 아니라 낮은 저항특성 때문에 안테나의 방사효율은 현저히 낮아진다. 또한, 근접물체의 영향을 생각하지 않는다면 소형 안테나의 방사 지향성은 무지향성이 된다. 전기적 소형 안테나의 설계에 있어서 위의 이러한 경향들은 바람직한 것이 아니다. 이러한 문제점들을 극복하기 위해 소형 안테나의 설계자들은 다양한 노우하우를 갖고 있다.

소형 안테나의 설계 및 평가에 있어서 여러 가지 고려하여야 할 파라미터 중에서 무엇보다도 중요한

것은 방사효율을 평가하는 것이다. 따라서, 본 고에서는 Wheeler cap법을 중심으로 방사효율의 측정법에 관하여 설명하기로 한다.

III. 안테나의 방사효율

도체로 구성된 일반적인 안테나에 저항이나 어떤 손실이 있으면 안테나에 공급된 전력은 공간으로 전부 방사되지 않고 공급 전력의 일부는 저항이나 손실에 의해서 전력의 소모가 일어난다. 즉, 공급된 전력은 공간으로 완전히 방사되지 않고 안테나에서 흡수된 전력을 제외한 나머지 전력만이 공간으로 방사된다. [그림 1]을 참조하면 안테나의 방사효율은 방사전력과 안테나 입력전력의 비로서 다음과 같이 정의할 수 있다.

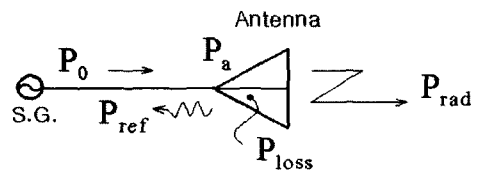
$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_a} = \frac{P_a - P_{loss}}{P_a} = 1 - \frac{P_{loss}}{P_a} = 1 - \frac{P_{loss}}{P_o(1-|\Gamma|^2)} \quad (1)$$

여기서, P_{rad} 는 안테나로부터 방사되는 방사전력, P_a 는 안테나의 입력전력이며, P_o 는 공급전력, P_{loss} 는 안테나에서 소모되는 손실전력, Γ 는 반사계수를 나타낸다.

식 (1)에서 방사전력은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S_r(\theta, \varphi) r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2)$$

여기서, $S_r(\theta, \varphi)$ 은 복소 포인팅벡터의 r방향 성분이다.



[그림 1] 안테나의 전력관계

안테나 내부의 손실저항과 안테나의 방사저항을 도입하면 식 (1)의 방사효율은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{P_{rad}}{P_a} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{loss}} = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{loss}} \quad (3)$$

여기서, R_{rad} 및 R_{loss} 는 각각 안테나의 방사저항 및 안테나의 손실저항이다.

IV. 소형 안테나의 방사효율 측정법

안테나가 소형이 되면 될수록 특성 측정은 어렵게 된다. 특히, 안테나 소자와 근접 물체를 하나로 취급한 안테나 계의 특성 평가는 더욱 복잡하며 측정이 곤란한 경우도 있다. 지향성 이득이 알려져 있을 경우에는 안테나의 이득은 방사효율로서 결정되므로 방사효율을 측정하게 되면 이득을 구할 수 있게 된다.

안테나의 방사효율은 방사전력과 입력전력과의 비이므로 방사효율을 측정하기 위해서는 방사전력을 정확히 구해야 한다. 정확한 방사전력은 방사패턴을 적분하여 구할 수 있지만 그렇게 간단하지는 않다. 이 때문에 간편한 측정 방법으로서 Wheeler cap법과 Q-factor법이 제안되어 있다. 안테나의 주위에 근접 물체가 있을 경우에는 특히 방사효율이 저하하는데, 이러한 경우의 효율측정에는 전파 산란체를 이용한 랜덤필드법이 제안되어 있으며, 이외에도 반사계수법, 라디오미터법 등이 보고되어 있다. 본 절에서는 중요한 몇 가지의 방사효율 측정법에 관하여 설명하기로 한다.

4-1 방사패턴 적분법

소형 안테나의 방사효율 측정 방법 중의 하나로 방사패턴 적분법^[5]이 있다. 방사패턴 적분법은 안테나에 입력되는 입력전력 P_a 와 안테나로부터 방사되

는 방사전력 P_{rad} 을 측정하여 식 (1)로부터 방사효율을 측정한다. 방사전력을 측정하기 위해서는 방사패턴을 안테나를 포함한 전 공간에 걸쳐서 측정해야 한다.

방사패턴 적분법에 의한 측정순서는 다음과 같다. 먼저, 안테나의 입력전력 P_a 를 측정한다. 다음으로 안테나의 중심에서 측정점까지의 거리 r 를 일정하게 하고 r 이 이루는 구면상의 (θ, φ) 에 대하여 방사패턴 $E_\theta(\theta, \varphi)$ 와 $E_\varphi(\theta, \varphi)$ 를 측정한다. 측정된 각 위치에서의 방사패턴 적분으로부터 전 공간으로 방사되는 방사전력이 구해지며 방사효율은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

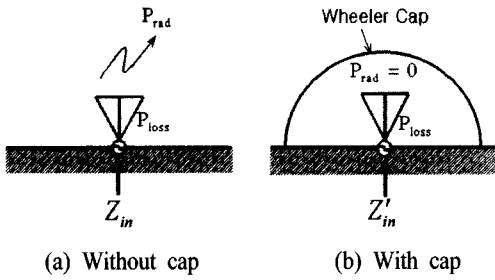
$$\eta = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi (|E_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |E_\varphi(\theta, \varphi)|^2) r^2 \sin\theta d\theta d\varphi}{\xi_0 P_a} \quad (4)$$

여기서, ξ_0 는 자유공간의 특성 임피던스이다.

이 방법을 적용하면 휴대폰과 같이 안테나가 부착된 안테나계의 방사효율을 측정하는데 적절하다. 휴대폰내에 신호발생기를 내장시키면 급전선의 영향을 배제한 방사패턴을 측정할 수 있다. 방사패턴 적분법은 방사전력을 직접 측정하므로 신뢰성이 높지만 입력전력과 방사전력을 별도의 측정계로 측정하므로 측정 시스템의 측정오차를 제거할 수 없으며, 전자파 무향실 등과 같은 고가인 대규모의 측정 시설이 필요하다. 또한, 방사패턴을 3차원적으로 측정하여야 하므로 측정에 많은 시간을 필요로 하는 것이 결점이다. 따라서 방사패턴 적분법으로 소형 안테나의 방사효율을 측정하기란 용이하지 않다.

4-2 Wheeler cap 법

Wheeler cap 법(또는 Wheeler 법)^{[5],[6],[11]}은 [그림 2]의 (b)와 같이 안테나를 중심으로 반경이 $\lambda/2\pi$ 인 구(radiansphere)^[7]를 완전도체의 cap(이를 Wheeler cap이라 함)으로 둘러싸고, 방사전력을 강제적으로 존재



[그림 2] Wheeler cap 법에 의한 방사효율의 측정

하지 않도록 하여 방사전력 P_{rad} 과 손실전력 P_{loss} 을 분리함으로써 방사효율 η 를 구하는 방법이다. 즉, 안테나에 Wheeler cap이 없을 때의 입력저항 R_{in} 과 Wheeler cap이 있을 때의 입력저항 R'_{in} 을 측정하여 방사효율을 구하는 방법이며 식 (1)로부터 안테나의 방사효율은 다음 식으로부터 주어진다.

$$\eta = 1 - \frac{R'_{in}}{R_{in}} \quad (5)$$

위의 식 (5)는 입력전력이 손실전력과 같다는 가정을 바탕으로 하여 얻어진다. 따라서, Wheeler cap이 있을 때와 없을 때의 안테나 전류분포가 일치할수록 방사효율은 참값에 가까워진다.

식 (5)는 $R_{in} > R'_{in}$ 인 범위에서 사용해야 하며 $R_{in} > R'_{in}$ 인 경우도 종종 발생한다. 이러한 경우는 음의 효율을 산출하게 되는데, 이에 대한 해결법의 하나로 어드미턴스 표현식을 이용하는 방법이 제안되어 있다^[8].

Wheeler cap법은 금속으로 구성된 Wheeler cap내에 피측정 안테나를 넣어서 입력저항을 측정하기 때문에 급전선의 영향이 포함된다. 따라서, 급전선의 영향을 없애기 위해서는 접지판의 아래에서 급전해야 하므로 모든 종류의 안테나에 적용할 수 없는 것이 단점이다.

Wheeler cap법을 이용한 방사효율 측정법은 간편하기 때문에 측정에 많은 시간이 필요하지 않으며

로 효율적이지만 다음과 같은 내용을 숙지할 필요가 있다^{[9],[10]}.

(1) Wheeler cap의 형상은 반구(hemisphere)가 아니라도 무방하며 직사각형의 금속 cap을 사용해도 된다. Wheeler cap 내의 안테나 위치는 급전점에서 cap의 가장 먼 내벽까지의 거리가 $\lambda/2\pi$ 가 좋다. 그 이유는 거리가 r 일 때 $kr=1$ 인 지점에서 근역장과 원역장의 크기가 같아지므로 (미소 다이폴과 미소 루프에서) Wheeler cap이 있는 경우나 없는 경우의 측정전력은 크게 변화하지 않기 때문이다. 또한, Wheeler cap이 너무 커지게 되면 공동의 내부 공진으로 인하여 공진 주파수 부근에서는 측정 오차가 발생하므로 주의가 필요하다. 따라서 금속 cap은 $kr=1$ 을 만족하는 크기가 가장 좋다.

(2) Wheeler cap을 둘러싸면 cap의 내벽에 전류가 흐르고 이로 인한 공동내벽의 손실이 손실저항의 측정치에 포함되기 때문에 Wheeler cap의 재료는 피측정 안테나의 도체보다 도전율이 좋은 양도체로 만드는 것이 바람직하다.

(3) Wheeler cap내의 안테나 위치는 cap내의 중앙이 좋다. 안테나가 cap의 내벽에 가까우면 내벽의 손실전력이 증가하게 되어 cap이 안테나의 전류 분포에 영향을 미치게 되며, 식 (5)를 도출하게 된 가정을 만족시킬 수 없으므로 방사효율의 측정치는 참값으로부터 벗어나게 된다. 즉, cap의 내벽에 흐르는 전류를 작게 하여 내벽의 손실전력을 감소시키기 위해서는 안테나를 중앙에 위치시키는 것이 좋다. 이러한 관점에서 생각하면 Wheeler cap을 너무 작게 할 수는 없다.

(4) 안테나의 공진점 부근에서는 Wheeler cap으로 인하여 안테나 단자의 전압과 전류가 변하게 된다. 이 때문에 측정 오차가 커지게 되므로 안테나의 공진점 부근에서는 측정하지 않는 것이 좋다. 안테나의 공진점을 제외한 주파수 영역에서는 Wheeler cap에 의한 안테나의 특성변화는 거의 없다. 즉 급

전점 부근의 전류와 전압은 안테나의 공진점 부근 이외의 주파수에 대해서는 거의 변화하지 않는다.

정밀 정확한 측정을 위해서는 안테나의 입력 임피던스 특성을 고찰하여 직렬 LC 등가회로로 나타낼 수 있는 안테나와 병렬 LC 등가회로로 나타낼 수 있는 안테나로 구분하고, 각각의 등가회로부터 Wheeler cap법에 의한 안테나 방사효율의 식을 유도하여 방사효율을 구하면 된다. 직렬 LC 등가회로로 나타낼 수 있는 안테나는 0.7파장 이하의 다이폴 안테나와 원주가 0.4파장 이하의 루프 안테나가 대표적이며, 병렬 LC 등가회로로 나타낼 수 있는 안테나는 원주가 0.5파장 부근의 루프 안테나 및 마이크로스트립 안테나가 대표적이다. 피측정 안테나의 입력 임피던스 특성을 관찰하여 이들 등가회로 중에서 어느 것에 해당하는가를 판단한 후 각각의 등가회로에 대응되는 방사효율의 측정식으로부터 방사효율을 구할 수 있다⁹⁾.

4-3 Q-factor 법

Q-factor법¹⁵⁾은 손실을 가진 피측정 안테나의 Q_{RL} 을 측정하고 손실이 없는 이상적인 안테나의 Q_R 를 계산하여 이들의 비로부터 방사효율을 구하는 방법이다. 피측정 안테나의 Q_{RL} 은 피측정 안테나의 입력 임피던스를 측정하여 구하며, 피측정 안테나와 동일한 구조를 가진 이상적인 안테나의 Q_R 은 Chu의 이론¹²⁾을 사용하여 구한다. 안테나의 Q가 크면 입력 임피던스의 주파수 특성으로부터 반전력 대역폭을 구할 수 있으므로 안테나의 Q를 구할 수 있다. Q-factor법은 이상적인 안테나의 Q_R 를 계산해야 하므로 측정만으로 방사효율을 구할 수는 없으며, Q_R 을 계산하기 어려운 문제점을 가지고 있다.

4-4 반사계수 법

안테나의 입력저항을 측정하는 대신에 안테나 단자의 반사계수를 측정하여 방사효율을 구하는 방법이다. 금속으로 구성된 cap을 이용하는 측면에서는 Wheeler cap법(입력저항을 측정함)과 동일하지만 반사계수법은 반사계수를 측정한다⁹⁾.

송신기와 안테나 사이의 전송손실은 없다고 가정하고, 금속 cap이 없는 경우의 송신기 출력전력을 P_o , 안테나 단자에서의 반사전력을 P_{ref} , 전압 반사계수를 Γ 라 하고, 금속 cap이 있는 경우의 각각을 P'_o, P'_{ref}, Γ' 라 하자. 금속 cap이 없는 경우의 안테나 입력전력은 $P_{in} = P_o - P_{ref}$ 이며, 금속 cap이 있는 경우는 $P'_{in} = P'_o - P'_{ref}$ 가 된다. 만약 $P_{loss} = P'_{in}, P'_o \cong P_o$ 인 조건이 성립한다면 방사효율은 다음 식으로 주어진다.

$$n = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} = \frac{|\Gamma|^2 - |\Gamma'|^2}{1 - |\Gamma|^2} \quad (6)$$

위의 식은 $|\Gamma'| \geq |\Gamma|$ 가 성립하는 범위 내에서 사용해야 한다.

간편한 방사효율의 측정법으로서는 Wheeler cap법이 대표적이지만 이외에도 라디오미터법¹¹⁾, 랜덤 필드법¹²⁾, directivity-gain법¹¹⁾ 등이 보고되어 있으며, 도파관에 가동 단락판을 설치하고 공동 구조를 형성하여 방사효율을 측정하는 개선된 Wheeler cap법의 연구 결과도 보고되어 있다¹³⁾. 자세한 내용은 문헌을 참고하기 바란다.

V. 맺음말

전기적 소형 안테나의 문제점을 살펴보고 소형 안테나의 평가 파라미터 중에서 중요한 파라미터의 하나인 방사효율의 측정법에 관하여 간단히 설명하였다. 방사패턴 적분법은 가장 정밀 정확하고 표준적인 방법이지만 측정에 많은 시간이 걸리며 고가

의 측정 시설이 필요하다. 본 고에서는 주로 간편하면서도 실용적인 Wheeler cap법을 중심으로 설명하였으며, Q-factor법, 반사계수법에 대해서도 언급하였다. 본 고가 소형 안테나의 연구에 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

참 고 문 헌

[1] H. A. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas", *Proc. IRE*, 35, 12, pp. 1479, Dec. 1947.

[2] L. J. Chu, "Physical limitations of omnidirectional antennas", *J. Appl. Phys.*, 19, pp. 1163, Dec. 1948.

[3] E. H. Newman, et al., "Wire Antennas in the presence of material bodies", *1976 AP-S International Sympo. Digest*, pp. 417, Oct. 1976.

[4] D. P. Nyquist, et al., "Coupling of small thin-wire antennas with human body", *ibid.*, pp. 421.

[5] E. H. Newman, et al., "Two methods for the measurement of antenna efficiency", *IEEE Trans.*, AP-23, 4, pp. 457-461, July 1975.

[6] G. S. Smith, "An analysis of the Wheeler method for measuring the radiation efficiency of antennas", *IEEE Trans. AP-25*, pp. 552-556, July 1977.

[7] H. A. Wheeler, "The radian sphere around a small antenna", *Proc. IRE*, 47, pp. 1325-1331, Aug. 1959.

[8] 김기채, "Wheeler Cap법을 이용한 안테나 방사 효율 측정의 일 개선법", 한국통신학회 하계종합학술발표회논문집, pp.359-361, Aug. 1990년.

[9] M. Haneishi, K. Hirasawa and Y. Suzuki, *Small and Planar Antenna*, Corona Pub., Tokyo, 1996.

[10] K. Fujimoto, "Some considerations of small antenna measurements", in K. Hirasawa and M. Haneishi(eds.), *Analysis, Design, and Measurement of Small and Low Profile Antennas*, Norwood, MA, Artech House, Chap. 9, 1992.

[11] D. M. Pozar, B. Kaufman, "Comparision of three methods for the measurement of printed antenna efficiency", *IEEE Trans. AP-36*, pp. 136-139, Jan. 1988.

[12] T. Maeda, T. Morooka, "Radiation efficiency measurement for electrically small antenna using radiowave scatters", *IEEE AP-S Int. Symp. Digest*, Syracuse, vol. 1, pp. 324-327, June 1988.

[13] R. H. Johnston, J. G. McRory, "An improved small antenna radiation-efficiency measurement method", *IEEE AP Magazine*, vol. 40, no. 5, pp. 40-48, Oct. 1998.

≡필자소개≡

김 기 채



1984년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)

1986년 3월: Keio Univ. 대학원 (공학석사)

1989년 3월: Keio Univ. 대학원 (공학박사)

1989년 4월~1993년 3월: 한국표준과학연구원 전자파연구실 선임연구원

1993년 4월~1995년 8월: 일본 후쿠오카

공업대학 정보공학과 조교수

1995년 9월~현재: 영남대학교 전자정보공학부 부교수, 한국전자과학회 편집상임이사

[주 관심분야] EMC/EMI 관련 안테나 및 측정시설, 소형 안테나, 전자파 이론 및 응용