

Abstract

복사구조(안테나 구조)에서 물리적 구조의 크기가 작아질수록 안테나 구조로부터 실제 복사전력은 점차 줄어들고 리액티브 축적(reactive stored) 에너지가 증가하게 되면서 안테나 구조로서의 복사효율이 매우 열화된다는 것은 널리 알려진 사실이다. 하지만 양자역학 분야에서의 quantum radiation의 예로서 라이만, 발머, 파셴 계열의 복사를 생각해 보면, 이러한 quantum radiation의 경우, 복사체인 원자 구조의 크기는 빛 파장의 수백분의 일에 지나지 않으면서도 복사가 잘 일어난다. 이러한 사실로부터 우리는 보다 작은 소형 안테나 구조를 기대할 수 있지 않을까? 본 글에서는 이러한 문제에 대하여 최근에 제기된 질문들과 이와 관련된 문제들에 대하여 간략히 살펴보고자 한다.

I. 서 론

소형이면서 효율적인 안테나(복사) 구조를 설계 제작하려는 갈망은 부단히 시도되어 왔으나 거의 실패로 끝을 맺었다고 볼 수 있다. 여기에서 소형이라는 단어는 요즈음 들어 최근 20여년동안 활기차게 연구되어온 이른바 “Small antenna”<sup>[1]</sup>에서 의미하는 그러한 복사구조(안테나 구조)에 쓰이는 형용사가 아니다. 여기(excited)된 원자 상태에서 기저 상태로 전자가 옮겨가면서 복사하는 경우의 원자를 안테나 구조로 생각해 본다면 이러한 원자구조의 복사체는 매우 소형이면서 효율적인 복사체로 볼 수 있다. 실제로 복사되는 파장은 원자(복사체)의

크기의 수백 배에 달한다. 따라서 기존의 안테나 공학에서 훌륭한 복사체로 알려져 있는 길이가 반파장에 해당되는  $\lambda/2$ (half-wavelength) 다이폴 안테나의 물리적 크기(또는 길이)와 비교해 보면 복사체로서의 원자의 크기는 초소형의 안테나 구조에 해당되는 셈이다. 이렇게 원자와 같이 작고도 효율적인 복사구조의 예(example)가 있음에도 불구하고, 이러한 작고도 효율적인 안테나 구조(복사구조)의 가능성에 대한 연구는 거의 중단된 것이나 다름없었다. 이러한 가능성에 대한 연구가 중단된 배경에는 Chu<sup>[2]</sup> 또는 Wheeler<sup>[3]</sup>의 연구 결과의 영향이 컸다.

II. 최근에 제기된 이의

Chu<sup>[2]</sup>는 일반적인 형태의 소형 안테나를 둘러싸는 최소반경의 작은 구면으로 구성된 가우시안 구면을 설정하고 그러한 가우시안 구면 외부의 field를, 가우시안 구면에서의 multipolar field expansion<sup>[2]</sup>을 사용하여 기술하였다. 그러나 그는 오직 electric multipolar field expansion을 사용하여, 앞서 진술한 가우시안 구면에서의 포인팅 벡터를 구하고 이러한 포인팅 벡터를 가우시안 구면에 대하여 적분하여 줌으로써 복소전력을 계산해서 안테나의 대역폭(bandwidth)과 선택도  $Q(=2w \cdot W/P$ , 여기에서  $w$ :각 주파수,  $W$ :평균 축적에너지,  $P$ :복사에너지)에 대한 결론을 도출한 바 있었는데 그의 결론은 “안테나 구조(복사구조)의 물리적 크기가 파장에 비하여 작아질수록 선택도  $Q$ 값이 급격히 증가하게 되어 임의형태의 작은 복사체의 저항손실(Ohmic loss)이 현저하게 증대되어 복사체 구조로서의 실용성을 잃게 된

다는” 것으로 요약된다. Chu는 그의 위와 같은 결론에 이르는 과정에서 가우시안 구 표면 외부의 전자계를 TM모드(전자계가  $H_\theta$ ,  $E_r$ 과  $E_\theta$  성분만으로 전개되는 경우)와 TE모드(전자계가  $E_\theta$ ,  $H_r$ 과  $H_\theta$  성분만으로 전개되는 경우)로 전개되는 두 가지의 경우로 나누어 별개의 문제로 다루었으며 이러한 결과로서 상기의 두 복사 문제를 각각 수직편파(vertically polarized)의 등방성(omni-directional) 안테나 문제와 수평편파(horizontally polarized)의 등방성 안테나 문제로 보았다. 물론 Chu는 TM과 TE 모드가 중첩된 경우에 얻어질 수 있는 원형 편파(circular polarization) 특성을 갖는 복사구조에 대하여도 다루었는데, 이 경우는 TM 모드와 TE 모드 사이에 인위적으로 위상차를 가해준 경우에 해당된다.

지금까지 살펴본 바와 같이 소형 안테나 구조는, 안테나 구조가 파장에 비하여 작아질수록, Q값이 급격히 증대되기 때문에 소형 안테나 주위에 축적된 리액티브 에너지가 복사에 의하여 소모되는 에너지에 비하여 매우 크게 되어 복사체로서의 실용성을 기대할 수 없다는 Chu의 결론은 TM 모드 또는 TE 모드의 각각의 별도의 경우로 분리하여 고립된 문제로 바라보고 얻은 결과이다.

실제로 임의형태의 소형 안테나 구조에 평면파가 입사하는 경우의 산란파(scattered wave)는 오직 TM(Electric) 모드 또는 TE(Magnetic) 모드, 즉 단일 모드만의 전개로 기술되지 않는다. 따라서 오직 TM 또는 TE 모드의 단일 모드만으로서 분리하여 얻는 Chu의 결론은 보편적(universal)이지 못하다는 것이 D.M. Grimes 교수<sup>[4]</sup>의 주장이다. 그는 소형의 수신용 biconical 안테나의 오른쪽에서, 전계의 방향이 biconical 안테나의 축 방향과 같은 편파를 갖는, 평면파가 입사할 때 biconical 안테나<sup>[5]</sup> 표면에 유기되는 전류 분포를 조사하였다.

그러한 수신용의 biconical 안테나의 유기 전류 밀도를 조사하여, 입사파로부터 에너지를 흡수하는

zero degree 모드는 입사 전자계로부터 안테나(복사소자)로 가해진(transferred) 모멘텀의 반을 흡수하고 나머지 반은 고계(higher degree)의 모드로 전이됨을 관찰했다. 좀더 구체적인 예를 들면 중심부에 부하된(center-loaded) 짧은 biconical 안테나의 경우, 안테나 표면에 유기되는 TE(magnetic) 모드의 dipolar 모드에 해당하는 전류와 TM(electric) 모드의 quadrupolar 모드에 해당되는 전류 모두가, 입사파가 입사되는 쪽에서는, 입사전계와 동상(in phase)이 되는 반면, 입사파가 입사되는 쪽과 반대되는 도체 표면과 cap(안테나의 양쪽 끝 면)에서는 입사전계의 위상과  $180^\circ$  차이(out of phase)를 갖게 됨을 관찰하였다. 이러한 결과로부터, 입사파가 없는 경우, 앞서 기술한 모드 전류(modal current)와 크기는 같고 위상이 반대인 유기 전류가 안테나 표면에 흐른다고 가정하면 수신 안테나 문제에서 송신안테나 문제로 바꾸어 생각할 수 있다. 이러한 경우에 zero degree 모드는 순 모멘텀(net momentum)을 복사하지 못하지만 고계(higher degree) 모드는 앞서 논의한 수신용의 경우에 받아들였던 모멘텀과 동일한 모멘텀을 복사하기 때문에 어느 정도의 지향성이 있는 복사패턴을 얻게 되어 Chu<sup>[2]</sup>가 결론으로 얻었던 등방성의 복사패턴과는 상반된다는 것이다.

또 다른 하나의 중요한 사고 실험(thought experiment)이 있다. 이미 언급한 바와 같이 원자에서의 전자가 여기상태에서 기저상태로 되돌아갈 때의 복사(spontaneous atomic radiation)문제를 생각해 보자. 이러한 경우, 복사파장은 잘 알려진 바와 같이 원자(안테나로서의 복사체)의 크기의 수백 배에 해당되며 복사효율도 좋을 뿐만 아니라 지향성 또한 매우 높다(high directivity). 이러한 상황에서 상세한 복사 mechanism이 어찌 되었든 간에, 우리는 등가 원리(equivalence principle)에 의하여 복사체(안테나 구조)로서의 원자를 둘러싸는 구형의 가우시안 표면을 가정하고 그 표면에 등가 키르히호프 전자계원

(equivalence kirchhoff source)으로 대체할 수 있다. 이러한 등가 전자계원은 매우 작은 초소형이지만 가우시안 표면 근처에 많은 양의 축적에너지도 주지 않고 복사도 잘 이루어지므로 “매우 작은 복사체는 실용적인 복사체가 될 수 없다”는 Chu의 결론과 상반된다. 지금까지의 논의가 Grimes 교수가 기존의 소형 안테나(복사체)의 제약조건에 관한 이론에 대하여 제기한 이의 내용에 해당된다. 그러면 지금부터 기존의 소형 안테나 이론<sup>[2]</sup>으로 설명될 수 없는 예(examples)에 대하여 살펴보자.

### III. 기존의 소형 안테나의 제약에 대한 반례들(Counter-examples)

여기에서 “기존의 소형 안테나의 제약”이란 이미 앞에서 논의한 바와 같이 안테나의 물리적 크기가 매우 작게 되면 Q값이 급격히 증가되기 때문에 실용적인 안테나가 될 수 없다는 것인데 이러한 제약을 어기기도 훌륭한 복사체로 될 수 있다는 의미에서 반례(Counter-examples)라는 단어를 사용하였다.

#### 3-1 Counter-example 1

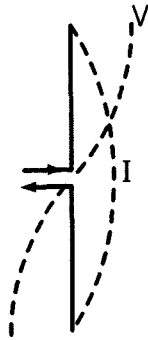
이미 앞에서 언급한 원자로부터의 복사 문제를 다시 생각해 보자. 원자를 둘러싼 가상적인 구 표면으로 된 가우시안 표면을 생각해 보면 복사체로서의 가우시안 구 표면의 직경은 복사파장의 수백분의 1 정도에 해당되는데도 복사가 잘 일어난다. 이러한 가우시안 구 표면에 등가원리(equivalence principle)에 의하여 적합한 등가전류와 자류원(equivalent electric and magnetic current source)으로 대체하면 원래의 문제(original problem), 즉 원자에서 전자가 여기상태에서 기저상태로 내려오면서 빛 에너지(photon)가 복사되는 문제와 등가적인 문제가 된다. 이 문제는, 주어진 복사패턴(지향성이 좋은)에 대하여, 복사파

장에 비해 매우 작은 구 표면에 위치하는 등가 전류원과 등가 자기전류원을 구하는 문제와 동일한 문제로도 볼 수 있다. 물론 이러한 등가전류 및 자기전류원은 작은 가우시안 구표면 근처에서 축적된 에너지가 매우 작아야 한다는 조건도 만족해야 한다. 여하튼 Counter-example의 첫 번째 예로서 여기된(excited) 원자로부터의 복사 문제를 선택한 셈이다. 그러니까 소형이면서 훌륭한 복사체가 되기 위해서는 복사체의 표면 근처에 축적된 reactive 에너지가 매우 작거나 소멸되거나 해서 복사체의 표면 근처로부터 바깥방향으로 실제의 유효전력의 흐름이 있어야 한다. 이러한 사고의 연장선장에서 Grimes 교수는 TE 모드와 TM 모드의 낮은 모드들에 해당되는 전류들의 조합으로 구성되는 ensemble 안테나를 제안하기도 하였다. 물론 이 경우에 불필요한 고차모드(higher order mode)를 없애야 하고 필요한 저차모드에 해당되는 전류간의 위상차의 정교한 조정에 어려움은 있으나 적어도 이론적으로는, 기존의 소형 안테나의 제약조건<sup>[2]</sup>과는 달리 소형이면서 좋은 복사체를 구현할 수 있다는 논지이다.

#### 3-2 Counter-example 2

1992년도에 AM 방송용 안테나 분야에서 기존의 모노폴 형태의 송신용 안테나에 비하여 매우 작은 형태의 초소형에 해당되는 안테나가 실용화<sup>[6]</sup>되었다고 보도되었다. 실용화되었다는 국가는 Egypt였다. 복사체(안테나)구조의 크기가 복사 파장의 100분의 1보다도 작은 이 초소형 안테나 구조에 CFA (Crossed Field Antenna)라는 이름이 붙여졌는데 그 동작원리는 다음과 같다.

먼저 일반적으로 널리 알려진 반파장 다이폴 안테나에 대하여 살펴본다. 이러한 구조의 경우 유기 전류  $I$ 와 전압  $V$ 의 파형은 정상파의 형태로서 [그림 1]에 주어진 바와 같다.

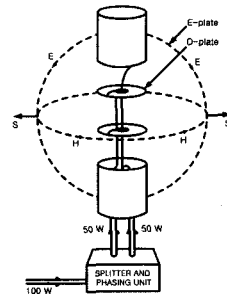


[그림 1] 반파장 ( $L = \lambda/2$ ) 다이폴 안테나의 전압 및 전류파형

급전점에서의 전압은 최소이고 전류는 최대가 되어 안테나 근처의 축적에너지로 인한 리액티브 값을 주게 된다. 따라서 안테나(복사 구조) 근처에서, 전계 E와 자계 H는 동상이 되지 않으며, 대략적으로 안테나의 중심부(급전부)로부터의 거리가  $\lambda/2\pi$  ( $\lambda$ : 파장) 보다 큰 지점에서 전계 E와 자계 H가 동상이 되어 포인팅 벡터에 의한 실제 복사 전력이 흐르게 된다.

다이폴의 길이  $L$ 이 파장  $\lambda$ 에 비하여 매우 작은 경우 ( $L \ll \lambda$ )에는 안테나 근처에서의 축적에너지와 리액티브 및 Q값이 급격히 증대되어 훌륭한 복사체로서의 성능을 기대할 수 없다. 이 내용은 작은 길이를 갖는 다이폴 안테나의 경우에 적용되는 타당한 논의이다. 그러나 이러한 상황에서도, 즉 매우 작은 다이폴 안테나 구조로부터 결코 좋은 복사체의 성능을 기대할 수 없는 상황에서도, 훌륭한 복사체가 구현될 수 있다는 주장<sup>6)</sup>이 나온 것이다.

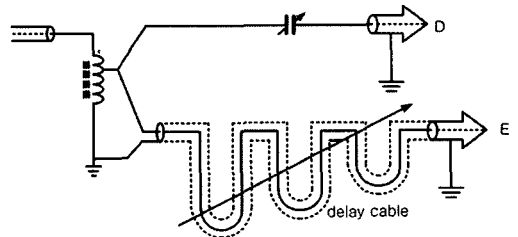
이 새로운 주장은 급전 방법에서부터 다르다. 즉 기존의 안테나 급전 방법을 [그림 1]에서와 같이 하나의 급전선(예를 들어 하나의 동축선)으로 급전하는데 반하여 여기에서 주장하는 급전방식은 두 개의 급전선으로 구성된다. 상세한 구조는 [그림 2]에 도시되어 있는 바와 같이 두 개의 E-plate와 두 개의



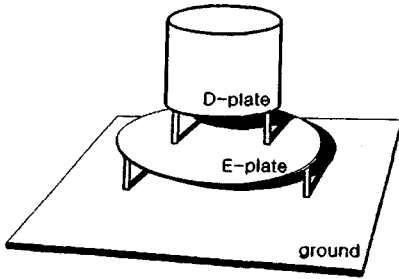
[그림 2] 원통 모양의 CFA

D-plate로서 구성되어 있는데 두 개의 E-plate는 전계를 구성하여 주고, 두 개의 마주 보는 원판 형태의 D-plate는 축전기 형태로서 두 plate 사이에 전계가 형성되어 있으며 맥스웰의 네 번째 방정식인  $\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t}$ 를 통하여 원판형 주위를 원형의 형태로 둘러싸는 폐곡선의 자계를 준다.

여기에서 만일에 두 E-plate 양단에 인가되는 교류 전압과 두 개의 D-plate 양단에 인가되는 전압이 동상(in-phase)이면 두 개의 E-plate에 의한 전계와 두 개의 D-plate에 의한 자계는 복사구조 근처에서  $\frac{\partial D}{\partial t}$ 의 연산 때문에 90도의 위상차를 갖게 된다. 그러나 [그림 3]에서와 같이 전력 분배기(power splitter)와 위상 변위기(phasing unit)를 사용하여 D-plate에 의한 자계와 E-plate에 의한 전계가 복사구조 근처에서 동상이 되도록 하면 복사구조 근처에서 축적된 리액티브 에너지 및 Q값도 현저하게 감소하고



[그림 3] Phasing unit



[그림 4] Ground plane을 이용해 제작된 CFA

동시에 소형이면서도 훌륭한 복사체 구조가 될 수 있다는 논리이다.

이렇게 구성된 AM 방송용 안테나는 그 높이(또는 길이)가 사용파장의  $\lambda/50$ 이고 단면 즉 D-plate의 직경이 사용파장의  $\lambda/150$ 에 해당되는 체적으로서 훌륭한 복사체로서의 기능을 보여주었다고 보고되었다. 이러한 구조는 접지면(ground plane)을 사용하여 복사구조의 실제 높이를, [그림 4]에서와 같이 반으로 줄일 수 있다.

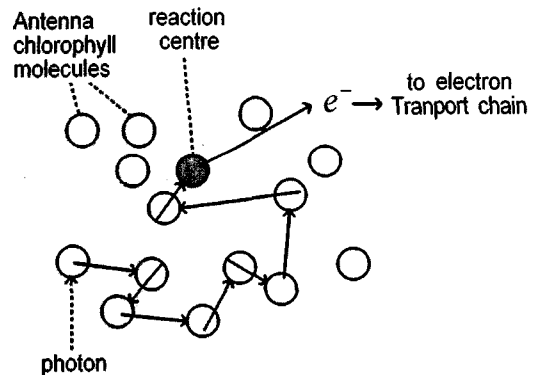
어쨌든 이러한 형태의 안테나 구조도 기존의 이론으로는 설명될 수 없는, 새로운 형태의 초소형 안테나로서 볼 수 있을 것이다. counter-example 1의 경우에서 ensemble 안테나에서는 두 모드에 해당되는 전류간의 요구되는 위상차의 구현이 중요한 반면, counter-example 2의 경우 power splitter를 통하여 입사전력을 정확히 1/2로 나누어서 나눈 전력의 두 전압파(voltage)의 위상차이가 정확히  $\pi/2$ 가 되도록 구현하는 과정이 중요한 과정이었다. 이로부터 우리는 이른바 초소형 안테나의 구조에서는 복사구조뿐만 아니라 적합한 위상차를 주는 급전구조의 함으로서의 총체적인 구조가 하나의 초소형 안테나를 구성하고 있다는 점을 강조해야 할 것이다.

### 3-3 Counter-example 3

분자생물학(Molecular biology)이나 생화학(Bioche-

mistry) 분야에서의 중요한 주제인 광합성 문제를 간단히 살펴보자. 수백 개의 엽록소(Chlorophyll)분자로 구성되어 태양에너지를 잡고 이러한 태양에너지를 반응중심(reaction center)으로 모아가도록 guiding(도파)해 주는 과정(process of light harvesting)은 일반적인 지구상의 광합성의 효율을 결정짓는 가장 중요한 부분이다. 여기에서 반응중심(reaction center)은 엽록소가 존재하는 부분의 매우 좁은 부분에 지나지 않는 영역인데 바로 이곳에서 모아진 포톤에너지가 광화학적인 에너지로 전환된다. 한군데의 반응중심으로 포획된 포톤에너지를 보내주는 엽록소 분자들의 집합을 안테나 계라고 하는데 실제로 이러한 안테나 계에는 단백질도 포함하고 있으며 이러한 안테나 계를 광 수확 안테나(light-harvesting antenna)라고 하며 여기에서 엽록소 주위의 단백질은 엽록소 분자들의 들뜬 에너지를 조금씩 차이가 나게 하여 광 수확 과정에서 에너지 손실을 최소화하는 기능을 한다고 알려져 있다.

[그림 5]에 임의의 엽록소 분자 포획된 포톤에너지(전자들의 들뜸 에너지)가 랜덤한 방식으로 반응중심으로 이전되어가는 모습을 도시하였다. 포획된 포톤에너지가 이러한 방식으로 반응중심으로 가면



[그림 5] 임의의 엽록소 분자에서 포획된 포톤에너지가 반응중심으로 모이는 과정

서 그 효율이 95 % 정도에 달한다고 하는 것은 참으로 흥미로운 일이 아닐 수 없다.

여하튼 빛의 포톤에너지가 염록소 분자를 여기시켜서 여기된 전자의 형태로서 에너지를 포획하는 mechanism은 counter-example 1에서 논의한 바와 같은 초소형 안테나의 mechanism에 속한다고 볼 수 있다.

### 3-4 토 론

지금까지 기존의 소형 안테나의 물리적 크기에 의한 제약<sup>[2]</sup>에 대한 이의로서의 counter-example에 대하여 현재의 움직임이나 최근의 실용 예(Egypt의 AM안테나)를 중심으로 다루어 보았다. 첫 번째 counter-example과 두 번째 counter example을 종합적으로 설명할 수 있는 이론을 기대해 보는 것은 무리일까?

또 하나 특기할 만한 사항이 있다. 최근 광합성에 대한 연구 동향으로 dendrimer 구조를 이용하여 광합성에 있어서의 광포집과 에너지 전달을 위한 물질 합성<sup>[7]</sup>에 적지 않은 노력을 기울이고 있는데 여기에서 dendrimer란 1980년대 중반에 미국의 Tomalia 에 의하여 소개된 규칙적인 가지 또는 분기형태로 구성된(사슬형태가 아닌) 새로운 형태의 고분자 화합물을 의미한다.

최근에 일본의 동경대학의 Aida 교수<sup>[7]</sup>는 이러한 고분자를 사용하여 광포집(light-harvesting)을 위한 dendritic antenna<sup>[7]</sup> 구조를 설계한 바 있는데 이는 앞으로 인공광합성(artificial photosynthesis) 분야에 의미 있는 일로 보일 뿐만 아니라 빛 에너지 수신을 위한 초소형의 분자 단위의 안테나 구조 연구에도 도움이 될 것으로 생각된다. 이렇게 생각해 보면, 즉 고분자 화합물로서 빛 에너지(photon)을 잡는(수신하는) 구조를 분자단위에서 설계해야 한다는 것을 생각해 보면, 지금 여기에서 논의하고 있는 소형 안

테나에 관한 이야기는 빛을 모으는 나노기술분야에 해당된다.

잠시 인간의 피부에서 뜨거움을 감지하는 센서 중에서 복사열을 감지하는 센서는 어떻게 구성되어 있을까 하는 질문도 생긴다. 이 경우 센서의 전기적인 출력은 뉴런을 통하여 전송된다. 이 때 뉴런의 구조는 신호 전달체계로서 우리가 잘 알고 있는 전송선(transmission) 모델로 묘사되기도 한다<sup>[8]</sup>. 뉴런은 정교한 신호전달 체계에 해당되지만 광합성의 경우에 빛에너지(포톤)에 의한 들뜸 에너지들이 반응중심(reaction center)으로 모아지는 과정은 전혀 다르며 아직까지 이러한 반응 중심까지의 에너지 집속과정(또는 도파과정)에 대하여는 만족할 만한 설명이 없다고 한다. 이렇듯이 자연계는 에너지를 모을 때와 신호를 도파시킬 때 다른 방식을 택하고 있는지도 모른다.

## IV. 결 론

초소형 안테나 구조와 관련된 최근 20여년 동안 논의되어 오고 있는 내용들 중에서 이미 교과서 수준에서 널리 받아 들여져 왔던 내용들에 대하여 반대편에 해당된다고 느껴지는 논의들을 중심으로 정리해 보았다. Quantum radiation이 자연계에 존재하는 초소형 안테나의 예가 된다면 광합성 현상 또한 그러할 것이다. 최근에 널리 이야기되는 나노기술의 중요한 부분인 광합성 문제도 본질적으로 전자기 복사 문제와 고분자 화학의 결합분야에 해당된다. 또한 앞으로의 회로 이론 및 전자회로 분야는 IC 또는 MMIC 분야에서 molecular level의 회로나 소자(device)쪽으로 움직여 갈 것이다. 이러한 생각에 입각해서 멀지 않은 미래에 전자파학회 회원들이 지녀야 할 지식의 범위가 어떻게 되어야 하는가에 대한 질문에 도움이 되고자 하는 기대를 갖고 본 글을 작성해 보았다.

우리 학회 회원님들의 멋진 질문과 반응을 기대  
해 본다.

## 참 고 문 헌

- [1] K. Fujimoto, A. Henderson, K. Hirasawa and S. R. James, *Small antennas*, Research Studies Press Ltd, pp. 6, 1987.
- [2] I. J. Chu, "Physical limitations of omni-directional antennas", *J. Appl. Phys.*, vol. 19, pp. 1163-1175, 1948.
- [3] H. A. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas", *Proc. IRE.*, vol. 35, pp. 1479-1484, 1947.
- [4] D. M. Grimes, "Atomic theory and radiative transfer on the basis of nonlinear, classical electrodynamics", pp. 310-356, *Essays on the formal aspects of electromagnetic theory*, ed. A. Lakhtakia, World Scientific Publ. Co., 1993.
- [5] D. M. Grimes, "Biconical receiving antenna", *J. Math. Phys.*, pp. 897-914, 23(5), May 1982.
- [6] F. M. Kabbary, M. Khattab, A. Fayoumi, A. M. Swidan and M. C. Hatley, "Extremely small high power medium wave broadcasting antennas", *Proc. 16th National Radio Science Conference (NRSC)*, Ain Shams Univ., Feb. 23-25, Cairo, Egypt, pp. B8.1-B8.12, 1999.
- [7] T. Aida, D. L. Jiang, E. Yashima and Y. Okamoto, "A new approach to light-harvesting with dendritic antenna", *Thin Solid Films*, vol. 331, pp. 254-258, 1998.
- [8] Kraus, Fleisch, *Electromagnetics with applications*, 5th ed, McGraw-Hill international edition, Ch. 9, pp. 501-520, 1999.

≡필자소개≡

조 영 기



1978년 2월: 서울대학교 전자공학 (공학사)

1981년 2월: 한국과학기술원 초고주파 (공학석사)

1998년 2월: 한국과학기술원 초고주파 (공학박사)

현재: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부

교수

현재: 국제전파연합 (URSI) Technical Committee, Fields and Waves 한국대표

현재: 한국전자파학회 학술위원회 위원장

현재: 경북대학교 정보통신 기술분야(연구중심) BK21 단장  
[주 관심분야] 안테나 이론, 마이크로파 공학, 전자기 산란 및 전자기 이론