흡수체 매질 특성을 고려한 이동통신 단말기 SAR 저감 방안 연구

정민석[0], 이범선
경희대학교 전파공학과
jfdtd@cvs2.khu.ac.kr, bomson@khu.ac.kr

Study of Mobile Phone Antenna for SAR Reduction Concerning Absorption Material Characteristic

Minseok Jung, Bomson Lee
Department of Radiowave Engineering, Kyunghee University

ABSTRACT

본 논문에서는 전력보존에 근거하여 휴대 단말기에 의한 SAR 저감 방안을 제시한다. 흡수체 매질에서의 전파의 반사, 흡수 및 투과관계를 고찰하였으며 흡수체의 최대 흡수조건을 만족하기 위한 매질 특성을 분석하였다. 정량적인 SAR 저감 방식 논의를 위해 SRF(SAR Reduction Factor)를 정의한 후 다양한 흡수체의 구조에 따른 SAR 및 SRF를 분석하였다.

Ⅰ. 서 론

최근에 이동통신기기의 사용증대로 전자파에 의한 인체의 위해 여부[(보통 SAR= $\sigma|\overline{E}^2| / 2\rho$ (W/Kg) (σ: 전기도전율, ρ: 비중, $\overline{E}$: 전계)으로 정량화]에 대한 관심과 우려가 높아져, 국내외 여러 연구단체에서는 이러한 SAR에 대한 중요성을 인식하여 단말기 안테나 배치[1]나 안테나 급전점의 위치[2], 흡수체의 위치[3], 안테나와의 거리, 각도[4], 안테나의 종류[5] 등 SAR에 영향을 미치는 여러 가지 파라미터들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

특히, 최근에 이동통신 단말기 사용시의 SAR 저감을 위하여 단말기에 흡수체를 부착하는 방법이 많이 연구되고 있다[3]. 흡수체의 경우, 유전율, 투자율 등의 흡수체 매질의 특성에 따라 그 흡수되는 정도가 매우 다르지만 이에 대한 정량적인 분석은 아직 미진한 듯 보인다.

본 논문에서는 먼저 휴대폰과 인체두부의 전력 상관관계에 대해 논하고 SRF(Sar Reduction Factor)를 정의한 후 흡수체를 단말기에 부착시 다양한 흡수체 구조에 따른 SAR 개선정도를 SRF를 통해 분석해보았다. 논문 [3]에서는 부착된 페라이트 흡수체의 길이 변화에 따른 SAR 저감 특성을 분석하였는데 본 논문에서는 좀 더 다양한 흡수체 구조에 대한 영향을 분석하였다. 또한 흡수체 매질에 대한 전파의 반사, 흡수, 투과 관계를 고찰하여 고정된 매질의 두께와 입사방향을 가정하였을 때 최대흡수를 갖는 유전율, 투자율을 추정하였으며 이러한 유전율과 투자율을 이용하여 SAR 및 SRF를 분석해보았다.

Ⅱ. 이동통신단말기 SAR 저감 방안

Ⅱ-1. 기본적인 설정

휴대폰에서의 입사전력 P_{in}은 두부에서 흡수되거나(P_h) 단말기에 부착될 수도 있는 페라이트에 흡수되며(P_f) 나머지는 공중으로 방사(P_r)된다. 그림1은 이러한 관계를 나타내준다.

가상의 표면 S를 설정하고 전력보존관계를 나타내면 아래와 같다[6].

$$P_{in} = \frac{1}{2} Re(VI^*) = P_r + P_h + P_f$$
$$= \frac{1}{2} Re\left[\int_s (\overline{E}\times\overline{H}^*)\cdot\overline{ds}\right] + \frac{1}{2}\int_{V_h}\sigma_1|\overline{E}|^2\,dv$$
$$+ \frac{1}{2}\int_{V_f}(\sigma_1|\overline{E}|^2+\sigma_2|\overline{H}|^2)\,dv \qquad -(1)$$

여기서 P_{in}= 안테나 입력 전력, V=안테나 급전부

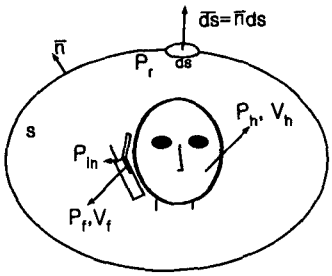


그림 1. 휴대폰과 인체두부의 전력 상관관계

의 복소 입력전압, I=복소 입력 전류, P_h=가상두부 모델에 흡수되는 전력, P_f=페라이트 기판에 흡수되는 전력, P_r=방사 전력, V_h=가상두부모델의 부피, V_f=페라이트 기판의 부피, $\overline{E}$=전계, $\overline{H}$=자계, σ_1=전기도전율, σ_2=자기도전율, $*$는 공액 복소수를 나타낸다.

위의 식을 이용하여 안테나 입력전력(P_{in})에 대한 두부 흡수율, 페라이트 기판 흡수율, 방사율을 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\text{방사율(또는 안테나 효율) } P_r(\%) = \frac{P_r}{P_{in}} \quad (2)$$

$$\text{두부 흡수율 } P_h(\%) = \frac{P_h}{P_{in}} \quad (3)$$

$$\text{페라이트 흡수율 } P_f(\%) = \frac{P_f}{P_{in}} \quad (4)$$

일반적으로 방사율, 두부 흡수율, 페라이트 흡수율을 합하면 항상 100(%)이 되어야 한다.

Ferrite 기판을 휴대폰의 두부 지향면에 적절히 부착할 경우, 휴대폰 접지면에서의 전류의 분포량를 조절하여 인체 두부로의 방사를 줄일 수 있다. 이 경우 두부 SAR가 저감될 수 있으나 문제는 페라이트 흡수체에 의한 전력 흡수로 방사전력도 함께 감소한다는 것이다.

흡수체 사용을 포함한 일반적인 SAR 저감 방안의 좀 더 정량적인 논의를 위해 아래와 같이 SRF(SAR Reduction Factor)를 정의한다(논문[4]참조).

$$SRF_{total}(\%) = \frac{P_{h_0} - P_h}{P_{h_0}} \times 100 \quad (7)$$

$$SRF_{1g}(\%) = \frac{SAR_{1g_0} - SAR_{1g}}{SAR_{1g_0}} \times 100 \quad (8)$$

$$SRF_{10g}(\%) = \frac{SAR_{10g_0} - SAR_{10g}}{SAR_{10g_0}} \times 100 \quad (9)$$

(같은 P_r 기준)

SRF(%)의 범위는 $0 \le SRF(\%) \le 100$ 로서 0%일때는 SAR 저감 효과가 없을 경우이고 100%는 SAR 값이 전혀 없을 경우이다. 흡수체가 있을 경우 P_h, SAR_{1g}, SAR_{10g}이 일반적으로 감소하는 것은 지극히 당연하나 방사전력도 같이 감소하므로 실제의 SRF의 계산에는 같은 방사전력(P_r)을 기준으로 상향 조정하여야 한다. 이렇게 하여 계산된 SRF 값이 크면 클수록 SAR 저감 효과가 큰 것으로 이해하면 된다.

II-2. 흡수체의 구조에 따른 SAR 및 SRF 분석

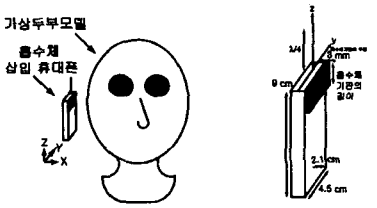


그림 2. 두부모델과 페라이트 기판이 삽입된 안테나 배치 (Case 1)

플립형 휴대폰에의 흡수체 부착에 따른 SAR를 분석하기 위한 시뮬레이션 환경은 그림 2과 같다. 두부모델과 휴대폰과의 위치는 두부모델의 귀 끝부분과 휴대폰의 수신스피커 부분과의 거리를 6mm로 고정하고 실제 통화자세에 근접시키기 위하여 휴대폰의 각도를 30° 정도 기울인 시뮬레이션 환경을 설정하였다. 여기에서 휴대폰과 차폐면의 매질은 PEC로 가정하였다. 두부모델에 대한 구조는 7개의 tissue층(연골, 근육, 눈, 뇌, 피부, 뼈, 혈액)으로 가정한 두부모델을 사용하는 XFDTD 프로그램을 사용하였다.

휴대폰의 경우에는 입력전력이 600 mW이고, 중심주파수가 1.83GHz인 모노폴 안테나가 부착된 플립형 구조를 가정하였으며 두부모델과의 거리는 3mm로 설정하였다. 이 후의 시뮬레이션은 모두 이 가정을 따른다.

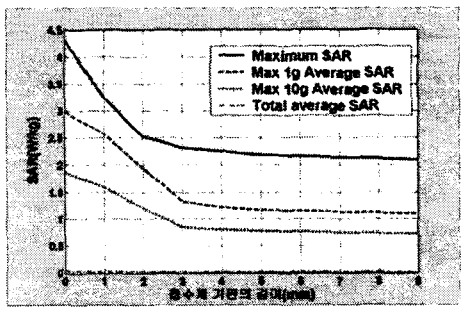


그림 3. 흡수체의 길이 변화에 따른 SAR(Case 1)

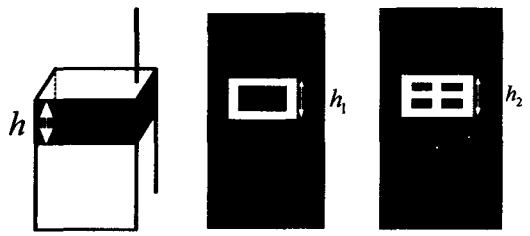
그림 3은 휴대폰의 접지면을 PEC (Per fect Electric Conductor)로 가정하였을 때, 유전율과 투자율이 각각 $\epsilon_r = 7.0 - j0.6$, $\mu_r = 2.8 - j3.3$이며 두께가 3 mm

인 패라이트 기판을 휴대폰의 전면에 부착하였을 경우(Case 1) 이 기판(흡수체)의 크기에 따른 SAR를 나타낸 그림이다. 흡수체를 휴대폰 크기의 1/3정도로 삽입했을 시 흡수체가 없을 때에 비하여 50%정도 큰 폭으로 감소되나 그 이상이 되면 매우 완만히 감소함을 알 수 있다. 흡수체의 길이에 따른 SRF를 표 1에 나타내었다. 같은 방사전력을 고려하였을 시에 약 3cm 정도의 흡수체를 삽입할 경우 SRF값이 완만히 포화됨을 알 수 있다.

표 1. 흡수체 길이에 따른 SRF 비교(Case 1)

Description	SRF_{total} (%)	SRF_{1g} (%)	SRF_{10g} (%)
1cm	8.11	-0.25	3.06
2cm	17.1	19.83	22.84
3cm	25.96	45.99	45.93
4cm	31.67	47.22	45.81
5cm	35.76	47.96	45.76
9cm	37	47.81	46.64

다양한 흡수체의 구조에 따른 SAR 및 SRF를 분석하기위하여 그림 4와 같은 흡수체 구조를 설정하였다. 시뮬레이션 환경은 그림 2에서 소개된 것과 같으며 휴대폰의 경우 두께 3 mm의 흡수체를 옆면까지 연장(Case 2)한 구조, 'ㅁ'자구조(Case 3), 격자구조(Case 4)로 나누어 각각의 흡수체 구조의 길이(h, h_1, h_2)에 따른 SAR 및 SRF를 비교하였다.



Case 2 Case 3 Case 4

그림 4. SAR, SRF 분석을 위한 다양한 흡수체 구조

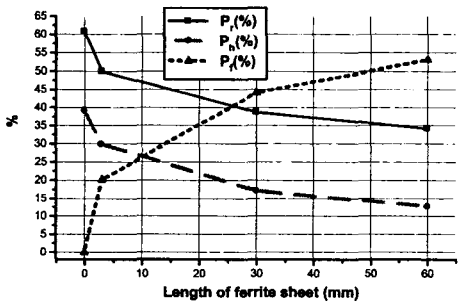


그림 5. 흡수체 길이(h) 변화에 따른 방사율, 두부 및 흡수체 흡수율(Case 2)

그림 5는 흡수체를 전면, 옆면에 부착하였을 경우(Case 2), 길이 h에 따른 방사율, 두부 및 흡수체 흡수율을 나타낸 그림이다. 길이가 증가할수록 두부 흡수율이 감소되나 옆면까지 부착시킴으로서 방사전력도 크게 감소됨을 알 수 있다. 흡수체 길이에 따른 SRF를 표2에 나타내었다. 길이가 커질수록 SRF는 증가하나 앞서 소개된 전면에 흡수체를 부착(Case 1)시켰을 때 보다 증가율이 적음을 알 수 있다.

표 2. 흡수체 길이에 따른 SRF 비교(Case 2)

Description (Case 1)	SRF_{total} (%)	SRF_{1g} (%)	SRF_{10g} (%)	SAR_{1g} (W/kg)	SAR_{10g} (W/kg)
0 cm	0	0	0	2.9885	1.9218
3 mm	7.15	1.22	4.95	2.4262	1.5014
3 cm	31.41	30.83	33.69	1.3173	0.8121
6 cm	42.19	27.02	31.56	1.2260	0.7393

그림 6은 단말기 전면의 끝 부분에서 가장 큰 전류분포가 나타남을 착안하여 전면에 'ㅁ'자 구조로 흡수체를 부착하였을 경우(Case 3)에 길이(h_1)에 따른 방사율, 두부 및 흡수체 흡수율을 나타낸 그림이며 표 3은 길이에 따른 SRF를 비교한 표이다. 'ㅁ'자 구조의 경우 흡수체의 면적 감소로 인하여 그리 큰 흡수가 되지 않았으며 SRF 또한 16~25% 정도의 SAR 저감율을 보임을 알 수 있다.

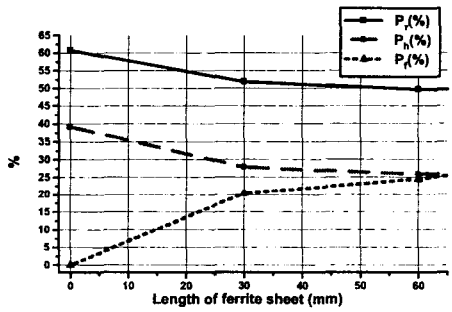


그림 6. 흡수체 길이(h_1) 변화에 따른 방사율, 두부 및 흡수체 흡수율(Case 3)

표 3. 흡수체 길이에 따른 SRF 비교 (Case 3)

Description (Case 2)	SRF_{total} (%)	SRF_{1g} (%)	SRF_{10g} (%)	SAR_{1g} (W/kg)	SAR_{10g} (W/kg)
0 cm	0	0	0	2.9885	1.9218
3 cm	16.66	24.61	26.09	1.920	1.211
6 cm	19.28	22.69	23.76	1.886	1.196
9 cm	15.43	17.39	23.36	2.025	1.208

그림 7은 격자구조의 흡수체를 단말기의 전면에 부착하였을 경우(Case 4), 흡수체의 길이(h_2)에 따른 방사율, 두부 및 흡수체 흡수율을 비교한 그래프이며 표 4는 SRF를 비교한 그래프이다. 이 경우 흡수체의 길이가 증가함에 따라 자유공간 방사율(15%)이 두부 흡수율(25%) 감소보다 적은 것을 알 수 있으며 SRF

의 경우 약 5cm 정도 부착하였을 시 SRF값이 완만히 포화됨을 알 수 있다.

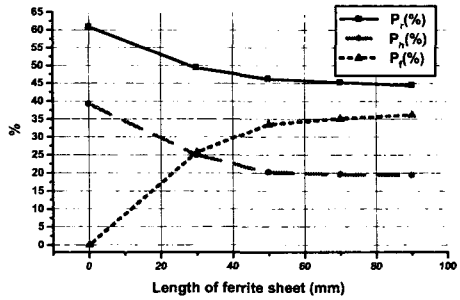


그림 7. 흡수체 길이(h_2) 변화에 따른 방사율, 두부 및 흡수체 흡수율(Case 4)

표 4. 흡수체 길이에 따른 SRF 비교 (Case 4)

Description (Case 3)	SRF_{total} (%)	SRF_{1g} (%)	SRF_{10g} (%)	SAR_{1g} (W/kg)	SAR_{10g} (W/kg)
0 cm	0	0	0	2.9885	1.9218
3 cm	21.05	32.86	34.98	1.6276	1.0137
5 cm	32.25	48.79	46.99	1.1635	0.7745
7 cm	32.86	45.95	44.42	1.2022	0.7951
9 cm	32.38	44.97	47.41	1.2014	0.7383

II-3. 평면파 입사조건에서의 흡수체 특성

흡수체에서의 최대 흡수 조건을 만족하는 유전율, 투자율을 추정하기 위해 그림 8과 같은 공기-흡수체-PEC 구조를 가정하게 되면 흡수체에서 반사되는 반사계수(R)는 아래의 식과 같이 나타 낼 수 있다[6].

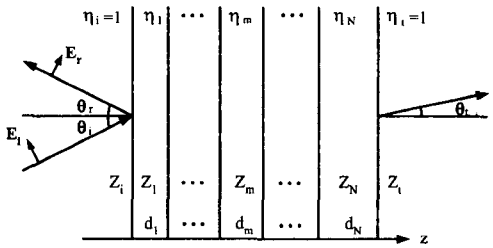


그림 8. 층이 있는 물질에서의 반사, 투과계수 산출을 위한 구조도(Vertical Polarization)

$$R = \frac{A + B/Z_t - Z_i(C + D/Z_t)}{A + B/Z_t + Z_i(C + D/Z_t)} \quad (7)$$

여기서, $A_m = \cos(\beta_m d_m)$, $B_m = jZ_m \cos(\beta_m d_m)$ $C_m = j\sin(\beta_m d_m)/Z_m$, $\beta_m = k_m \cos(\theta) =$ $k_m(1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{rm}} \sin\theta)^{1/2}$, $k_m = k_0\sqrt{\varepsilon_{rm}}$, k_0는 자유공간에서의 파수, k_m는 매질 내에서의 파수, β_m은 z 방향으로의 전파상수, d는 매질의 두께를 나타낸다. 수직(Vertical) 및 수평(Horizontal) 편파의 경우에 있어서, 매질내의 전계와 자계의 접선방향(tangential direction)성분의 비로 정의된 파동임피던스 Z_m은 아래와 같이 각각 나타낼 수 있다.

$Z_m = \eta_m / \cos\theta$ (수평편파 또는 TE파의 경우) (8)

$Z_m = \eta_m \cos\theta$ (수직편파 또는 TM파의 경우) (9)

매질내에서의 고유임피던스 η_m은 아래와 같이 주어 진다.

$$\eta_m = \sqrt{\frac{\mu_m}{\varepsilon_m}} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_{rm}}{\varepsilon_0\varepsilon_{rm}}} = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{rm}}} \quad (\mu_r=1\text{로 가정}) \quad (10)$$

식(7)에서 주어진 반사계수 R은 식 (8)와 (9)만을 고려하면 수직편파 입사경우와 수평 편파 입사 경우에 공히 사용될 수 있기 때문에 매우 편리하다. 식(7)은 일반적인 N개의 층을 갖는 매질일 경우, 각 층에 대한 ABCD matrix를 전부 곱하여 구할수 있으나[6], 본 논문에서는 PEC로 가정된 단말기 면에 부착된 단층의 흡수체 특성 고찰이 목적이므로 N=1인 경우만 사용한다.

위의 식들을 이용하여 흡수체에서의 각도에 따른 최대 흡수 조건을 만족하게 되는 매질의 유전율, 투자율을 추정하는 방법은 다음과 같다. 주파수(f), 두께(l), 입사방향(θ_i)이 주어지면 초기 투자율($\mu_r=1$ 또는 임의의 투자율)을 가정하여 매질에서의 흡수($1-|R|^2$)가 최대가 되는 유전율($\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r1}' - j\varepsilon_{r1}''$)을 결정할 수 있게 된다. 이 유전율을 이용하여 다시 흡수가 최대가 되는 투자율($\mu_{r1} = \mu_{r1}' - j\mu_{r1}''$)이 결정되며 이러한 작업을 몇차례 반복하면 곧 수렴하게 되고 결국 흡수체에서의 최대 전력 흡수율을 가지는 매질의 유전율과 투자율(ε_{rm}, μ_{rm})을 추정할 수 있게 된다. 그림 9는 이러한 반복법을 이용하여 f=1.83 GHz, l=3 mm이고 입사방향(수직편파 가정)이 각각 0, 30, 60 °로 가정하였을 때 흡수체에서 최대 흡수가 되는 유전율, 투자율을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 입사방향에 따라 최대흡수를 만족하는 유전율과 투자율은 일정하지 않음을 알 수 있다.

그림 9. 각도에 따른 유전율 변화 (수직편파의 경우)

표 5는 입사방향이 각각 0, 30, 60 °일 때의 최대 흡수조건을 만족하는 유전율과 투자율들을 각각 Case 5, 6, 7라고 가정하고 그림 2와 같은 시뮬레이션 환경에서 Case 1의 구조를 가정하였을 시 Total SAR_{Total}, SAR_{1g}, SAR_{10g}를 비교한 표이다. 입사방향이 60 °인 경우를 제외하고는 [3]의 문헌에 제시되어 있는 유전율, 투자율(Case 1)에서 보다 SAR가 저감됨을 알 수 있다.

표 5. 유전율 변화에 따른 Total SAR, 1g SAR, 10g SAR 비교표

구분	ϵ_r		μ_r		SAR_{Total}	SAR_{1g}	SAR_{10g}
	Re	Im	Re	Im	(W/kg)	(W/kg)	(W/kg)
Case 1	7	0.6	2.8	3.3	1.8473 $\times 10^{-2}$	1.2543	0.8213
Case 5	20	10	9	11	1.6204 $\times 10^{-2}$	0.9772	0.6512
Case 6	18	15	15	17	1.4271 $\times 10^{-2}$	0.8587	0.5101
Case 7	38	28	12	3	1.8685 $\times 10^{-2}$	1.6223	1.0569

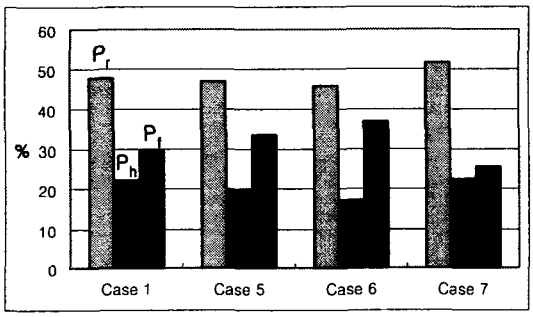


그림 10. 유전율 변화에 따른 방사율, 두부 및 흡수체 흡수율

표 6. 유전율 변화에 따른 SRF_{Total}, SRF_{1g}, SRF_{10g} 비교표

구 분	SRF_{Total} (%)	SRF_{1g} (%)	SRF_{10g} (%)
Case 1	25.96	45.99	45.93
Case 5	35.02	57.56	56.02
Case 6	41.34	61.78	64.70
Case 7	42.25	45.71	45.01

그림 10과 표 6은 유전율 변화에 따른 방사율, 두부 및 흡수체 흡수율, SRF 값을 보여주고 있다. 같은 방사전력을 가정하였을 때 최대 흡수조건을 만족하는 유전율과 투자율을 가지는 흡수체를 부착하였을 경우, 흡수체가 없을 때에 비하여 45~60% 정도 SAR_{1g}가 개선됨을 알 수 있으며 특히 유전율과 투자율이 각각 $\epsilon_{rm}=18-j15$, $\mu_{rm}=15-j17$일 경우(Case 6) SRF_{total}, SRF_{1g}, SRF_{10g}이 각각 41, 61, 64%로 크게 개선됨을 알 수 있다.

Ⅲ. 결론

흡수체를 단말기에 부착시 다양한 흡수체 구조에 따른 SAR, SRF를 분석해본 결과, 격자구조의 경우 5cm 정도 부착하였을 시에 매우 우수한 SAR 저감 특성(SRF_{total}=32.25%, SRF_{1g}=48.8%, SRF_{10g}=47%)을 보였다. 또한 흡수체 매질에 대한 전파의 반사, 흡수, 투과 관계를 고찰하여 고정된 매질의 두께와 입사방향을 이용하여 최대흡수를 갖는 유전율, 투자율을 추정할 수 있었으며 이러한 유전율, 투자율을 이용하여 시뮬레이션해본 결과 유전율과 투자율이 각각 $\epsilon_{rm}=18-j15$, $\mu_{rm}=15-j17$일 경우(Case 6), SRF_{total}, SRF_{1g}, SRF_{10g}이 각각 41, 61, 64%로 크게 개선됨을 알 수 있었다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R02-2000-00264)지원으로 수행되었음

참고 문헌

[1] 이애경, 최형도, 김진석, "이동통신단말기 안테나 배치에 따른 두부의 전자파 흡수율", 한국전자파학회논문지, pp1095-1102, 1999년 12월

[2] Joonho Byun, Juhyung Lee, "FDTD Calculation of SAR for the Monopole Antenna on the Conducting Box in terms of the Structure near by Feed", IEEE APS, Vol.2., pp76-79

[3] Jianqing Wang and Osamu Fujiwara, "Effects of Ferrite Sheet Attachment to Portable Telephone in Reduction Electromagnetic Absorption in Human Head", IEEE ISEC, Vol.2, pp822-825, 1999

[4] 정민석, 이범선, "이동통신단말기 SAR 저감 방안 분석", 한국전자파학회학회지, vol. 13, no. 2, pp155-163, 2002년 2월호

[5] 김현경 외, "PCS 전화기의 안테나 구조에 따른 SAR 분석", 한국전자파학회 종합학술발표회 논문집, Vol 10., No 1., pp 306-310, 2000년 11월

[6] Akira Ishimaru "Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering", Prectice Hall, pp. 16-17, 43-45, 1991