

---

# 복수 원통형 인체모델에서의 흡수전력 저감

양준원<sup>†</sup>, 김형호<sup>††</sup>

## Reduction of specific absorption rate(SAR) in multiple cylindrical-human models

Jun-Won Yang<sup>†</sup>, Hyung-Ho Kim<sup>††</sup>

**요 약** 최근 전파의 이용이 급증하면서 전파가 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. 전파가 인체에 미치는 영향에 관한 많은 연구 결과 많은 것이 밝혀졌으나, 실제 전자계 환경에서 인체 보호에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 실험을 위해서 강한 전파를 다루는 연구자들에게 직접적인 보호 방법은 아주 중요한 문제이다. 본 논문에서는 간단한 구조의 차폐를 통한 인체 내 전력 흡수율(SAR) 저감시키기 위한 보호 방법을 제안하고, 2개의 원통형 인체모델을 이용하여 완전도체로 구성된 차폐판 크기와 조사방향에 따른 SAR의 저감효과를 계산하여 그 유효성을 확인하였다.

**주제어** : SAR, 전자파, 완전도체, 차폐, 원통형 인체모델

**Abstract** As applications of electromagnetic waves increase, biological effects caused by the EM waves are worried about. Many studies about the biological effects are reported. However, there are only a few reports on protection against the EM waves. The protection should be considered for the researchers who use strong EM waves in their experiments. In this paper, a method of reducing SAR in a cylindrical human model by a shield plate is proposed for RF engineers exposed to strong electromagnetic waves. The shield plate modeled as an arc structure is shown effectively to protect the cylindrical human model from the exposed field.

**Key Words** : SAR, electromagnetic wave, perfect conductor, shield, cylindrical-human model

---

### 1. 서론

휴대전화의 급속한 보급에 따라 일상생활 주변에서 전자파가 인체에 미치는 영향과 안전노출 허용 한계에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 레이더 기지, 방송 중계소, 이동통신 기지국 주변에서는 수[KW] ~ 수천[KW]에 이르는 고전력 송신이 이루어지고 있으며, 이러한 환경에서 근무하는 작업자에 대한 안전성 확보는 중요한 문제이다.

전자파가 인체에 미치는 영향으로는 자극작용, 열작용 그리고 비열작용 등을 생각해 볼 수 있다. 자극작용은 전자계로 인한 생체에 유도되는 전류로부터 발생하는 감각적 반응으로 전류의 크기와 흐르는 시간에 따라 달라진

다. 열작용은 손실매질인 인체에 전기 에너지가 흡수되어 발생하는 작용이며, 비열작용은 열 이외의 원인으로 부터 나타나는 현상으로 명확히 비열적 작용이라 할 수 있는 현상은 드물다.

이러한 각 작용의 특성을 고려해 볼 때 전자파의 주파수가 인체에 영향을 미치는 중요한 인자인 것은 널리 알려져 있다. 실제 전파환경에서는 광범위한 주파수의 영향을 받을 가능성이 있으나, 본 논문에서는 고주파 전자계인 300[MHz] ~ 3[GHz]를 대상으로 하였다. 이 주파수 영역에 의한 주된 작용은 열작용이다. 열작용 영향에 대한 중요한 평가 요소는 인체에 흡수되는 전파의 전력 크기이므로, 전력 흡수량을 표시하는 비흡수율(Specific Absorption Rate : SAR)[1]이 평가의 일반적인 척도로 사

---

<sup>†</sup> 대불대학교 컴퓨터교육과 교수

<sup>††</sup> 대불대학교 컴퓨터교육과 교수 (교신저자)

논문접수 : 2012년 1월 13일, 1차 수정을 거쳐, 심사완료 : 2012년 2월 17일

용되고 있다.

그리고 인체에 대한 전력 흡수량을 계산하기 위한 모델[1][2][3][4]은 평면 모델, 구 모델, 원통형 모델, 블록 모델 등이 제안되어 있으며, 계산의 목적에 따라 모델을 선택할 필요가 있다. 최근에는 컴퓨터의 계산용량 및 계산속도의 향상으로 블록 모델이나 해부학적 리얼 모델을 이용한 계산이 증가하고 있다.

그러나 마이크로대역(300[MHz] ~ 3[GHz])에서는 파장에 비해 인체의 크기가 크기 때문에, 다체문체나 복잡한 구조의 문체에서는 분해수가 급증하는 리얼 모델 수치계산은 쉽게 접근하기 어렵다. 또한 이들 인체모델을 이용한 SAR 계산 결과는 거의 한 개의 인체모델을 대상으로 하고 있으며, 복수 모델에 의한 연구[4][5][6]는 찾아보기 힘든 것이 현실이다.

인체에 대한 전자파 보호 기준은 국제적으로 전자파 조사량에 관한 기준치 또한 SAT을 지표로 설정하고 있다. 예를 들어 미국 ANSI 기준(ANSI C95.1 -1991)[1][7]는 6분간 전신평균 SAR이 0.4 [W/kg] 이하, 국소 SAR이 8[W/kg] 이하가 되는 전계강도, 자계강도 혹은 전력밀도의 평균치로 규제하고 있다. 이러한 안전기준에 대한 많은 연구[8]는 되어 있으나 인체의 직접적인 보호에 관한 연구는 많지 않은 것이 현실이다.

따라서 본 논문은 인체의 직접적인 전파 보호 방법을 고찰하기 위해, 2장에서 원통형 인체 계산 모델 제시와 차폐에 의한 보호 모델의 계산법에 대한 유효성에 대해 살펴보고, 3장은 복수 원통형 인체모델의 상호관계 및 완전도체 차폐에 의한 계산 결과를 고찰하였다. 마지막 장에서는 다음과 같은 결론을 도출하였다.

그 결과 복수개의 인체모델에 대한 상호관계 분석과, 간단한 구조의 차폐를 통한 인체 내 전력 흡수율(SAR) 저감시키기 위한 보호 방법을 제안하였으며, 완전도체로 구성한 차폐판 크기와 조사방향에 따른 SAR의 저감효과와 그 유효성을 증명하였다.

## 2. 계산 모델

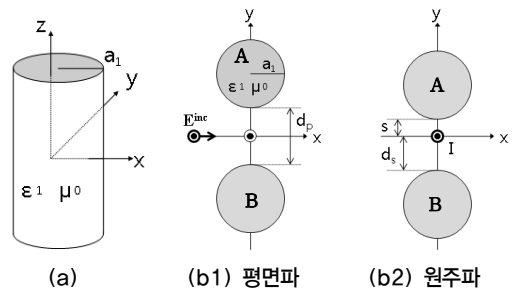
### 2.1. 원통형 인체모델 구조

원통형 인체모델[1][9][10]은 그림 1(a)와 같이 z축 방향으로 무한 길이인 반경  $a_1$ , 복소 유전율  $\epsilon_1$ , 투자율  $\mu_0$ 인 유전체 원통형으로 설정하고, 그림 1(b)와 같이 2개의 인체모델에 대한 상호결합에 따른 SAR변화를 살펴보았다.

그리고 원통형 인체모델을 균일 매질로 가정하였다. 물론 정밀한 계산을 위해서는 정확한 형태와 혈류 등을 고려한 모델이 필요하지만, 여러 명이 존재하는 경우에 대한 SAR의 변화나 차폐에 의한 SAR 저감 경향을 알기 위한 것이므로 상세한 모델에 의한 계산의 필요성은 없을 것으로 판단하였다.

그림 1(b1)는 인체모델 사이의 거리를  $d_0$ 로 하고, 주파수  $f$ , 전력밀도 P인 파원은 z축과 평행한 성분의 TE파를 x축 방향에서 입사시킨 경우이다.

그림 1(b2)는 한 인체모델을 파원에서 거리 s로 고정시키고, 다른 인체모델까지의 거리  $d_s$ 를 변화시키면서 SAR을 계산하였다. 파원은 원점에서 주파수  $f$ , 전류 I인 선파원에서 방사된 원주파로 하였다.

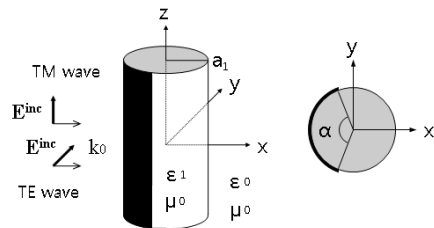


[그림 1] 인체모델과 좌표계

그리고 인체모델 상호간의 작용만을 살펴보기 위해 주위는 아무것도 없는 무한공간으로 가정하였다.

### 2.2. 차폐에 의한 보호 모델

앞에서 기술한 바와 같이 인체에 직접적인 보호를 위해 완전도체로 차폐된 경우에 대한 SAR을 계산하기 위해 그림 2에 완전도체로 차폐된 인체모델을 제시하였다.



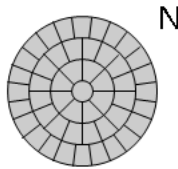
[그림 2] 완전도체 차폐 보호 모델

원통형 인체모델에 주파수  $f$ , 전력밀도 P인 z축에 평행한 전계성분을 가진 TE파 또는 y축에 평행한 전계성

분을 가진 TM파가 x축 방향에서 입사한 경우에 대하여, 인체모델 표면에 각도  $\alpha$  범위만큼 완전도체로 차폐하여 SAR의 저감 정도와 산란 패턴을 계산하였다. 이 때 완전도체의 두께는 고려하지 않았다.

### 2.3. 전자계 계산 방법

인체모델의 SAR을 구하기 위하여 적분방정식[11]과, 그림 3과 같이 N개의 셀로 분할한 모멘트법을 이용하기로 한다. 그리고 2개의 인체모델을 다루고 있으므로, 같은 면적으로 이루어진 총 2N개의 셀로 분할하였다.



[그림 3] 인체모델의 분해

이 경우 국소 SAR은

$$(Local\ SAR)_n = \frac{\sigma |E_n|^2}{\rho} \quad (1)$$

이 된다. 여기서  $E_n$ 은 n번째 셀의 전기장,  $\sigma$ ,  $\rho$ 는 인체의 도전율과 밀도이다.

국소 SAR의 합을 인체모델의 단면적으로 나누면 평균 SAR을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Average\ SAR = \frac{\sum_{n=1}^N (Local\ SAR)_n}{\pi a_1^2} \quad (2)$$

다음으로 표면의 일부를 완전도체로 싸고 있는 간단한 구조의 유전체(원통형 인체모델)를 다루므로 산란패턴을 구하기 위해 Point-matching법[12]을 사용하여 계산하였다. Point-matching법은 산란문제에 있어서 서로 다른 경계조건을 가진 매질이 존재하는 경우 계산이 용이한 장점을 가지고 있다.

여기서 산란패턴은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n^s e^{-j(n\phi - (2n+1)\pi/4)} \quad (3)$$

$$c_n^s = \begin{cases} a_n^s & (TM\ 파) \\ b_n^s & (TE\ 파) \end{cases}$$

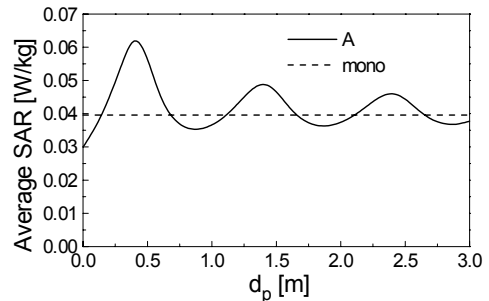
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 2개의 원통형 인체모델에 대한 SAR

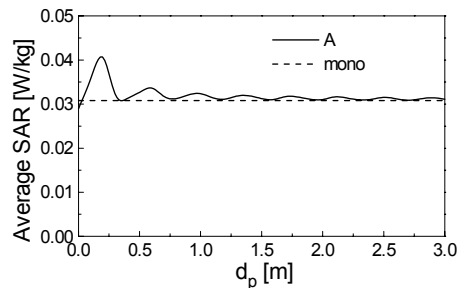
2개의 원통형 인체모델을 그림 1(b1)와 같이 배치하고, 인체모델 사이의 거리  $d_p$ 를 변화시켰을 때의 SAR을 그림 4에 표시하였다. A모델과 B모델의 평균 SAR은 같기 때문에 A모델의 결과만 나타내었다. 그림 4로부터 인체모델간의 거리  $d_p$ 가 멀어짐에 따라 상호작용으로 인한 큰 진동이 발생되고 한 개의 모델만 있는 경우의 값으로 수렴되었다.

여기서 사용한 평면파는 그림 1과 같이 z축에 평행한 전기성분을 가진 TE파와 y축에 평행한 전기성분을 가진 TE파로 하였다. 주파수는 인체 공진주파수 영역인  $f = 300$ [MHz]와 휴대전화 사용영역인  $f = 800$  [MHz]를 사용하였다.

300[MHz]의 경우,  $d_p = 0.4$ [m]에서 공진되고 한 개의 모델만 있는 경우의 값  $0.04$ [W/kg]에 비해 평균 SAR이 최대 약 1.5배인  $0.062$ [W/kg]으로 증가됨을 알 수 있다. 800[MHz]에서는 파장이 짧아지므로 공진이 일어나는 간격도 좁아지지만 300[MHz]와 비교해보면 증가율이 감소되었으나,  $d_p = 0.2$ [m]에서 최대 1.6배 정도로 증가됨을 알 수 있었다.



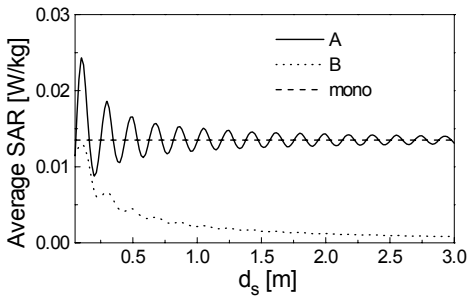
(a) 300[MHz]



(b) 800[MHz]

[그림 4] 인체모델 간 거리에 대한 평균 SAR

그림 5는 그림 1(b2)의 인체모델 B와 선파원의 거리 $d_s$ 에 대한 A, B 각 모델의 평균 SAR의 결과이다. B 모델은 한 개의 모델만 있는 경우의 값보다 항상 작은 값을 보이고 있으나, A는 결합작용으로 인해 큰 공진이 발생되며, 특히  $d_s = 0.1$ 에서 최대 0.025[W/kg]의 값을 보이고 있다. 이는 한 개의 모델인 경우에 비해 2배 가깝게 증가한 값이다. 평면파의 경우에 비해 인체모델 간 거리 변화에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

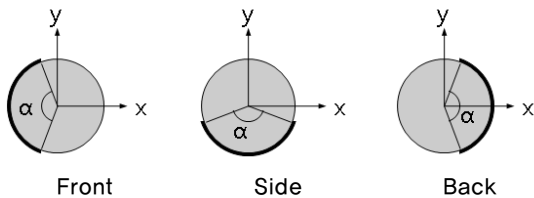


[그림 5] 인체모델과 선파원 간의 거리에 대한 평균 SAR

### 3.2. 완전도체로 차폐한 경우의 SAR 저감파 산란패턴

입사되는 평면파는 그림2와 같이 z축에 평행한 전계성분을 가진 TE파와 y축에 평행한 전계성분을 가진 TE파로 하였다. 각각 전력밀도는  $P = 1$ [mW/cm<sup>2</sup>], 주파수에 대해서는  $f = 300$ [MHz]와 hot spot[1]영역인  $f = 1.5$ [GHz]로 계산하였다.

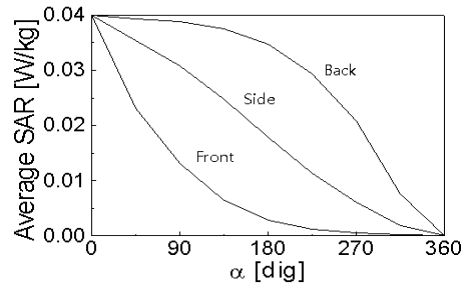
그림 6과 같이 두께를 고려하지 않은 완전도체로 차폐한 경우에 대해, 인체모델 표면을  $0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ 으로 변화시켜 가면서 계산하였다.



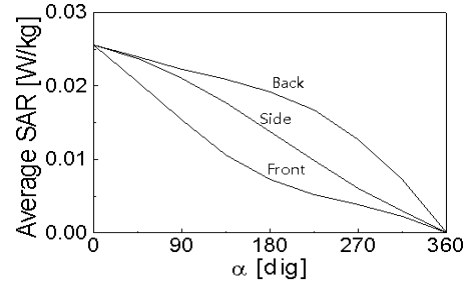
[그림 6] 완전도체 차폐 피복 범위

그림 7은 300[MHz]에 대해 (a)가 TM파, (b)가 TE파의 결과이다. TM파의 경우 Front에서  $\alpha = 90^\circ$ 인 경우 평균 SAR이 0.013[W/kg]으로 차폐가 없는 경우(0.04[W/kg])에 비해 dir 30% 저감되었음을 알 수 있다.

더욱이  $\alpha = 180^\circ$ 까지 증가 시키면 10%까지 저감됨을 확인할 수 있다. Side에서도  $\alpha = 180^\circ$  이상에서 50% 미만으로 평균 SAR이 저감되고 있다. 그러나 Back에서는  $\alpha = 270^\circ$ 로 확장하여도 50%의 저감을 기대할 수 없었다. TE파의 경우, Front의  $\alpha = 90^\circ$ 에서 약 60% 정도이며,  $\alpha = 180^\circ$ 에서는 30% 정도임을 알 수 있다. 그러나 Back에서는  $\alpha = 270^\circ$ 에서 약 50%로 TM파 보다 효과적인 저감효과를 관찰할 수 있다. 여기서 TE파는 TM파에 비해 회절과 흡수가 영향을 끼치는 것으로 판단된다. 회절과 흡수가 큰 TE파의 경우 Front에서 회절과 영향으로 인한 차폐효과가 감소되고, Back에서는 회절과 차폐되므로 다소 저감효과가 증가하고 있음을 알 수 있다.



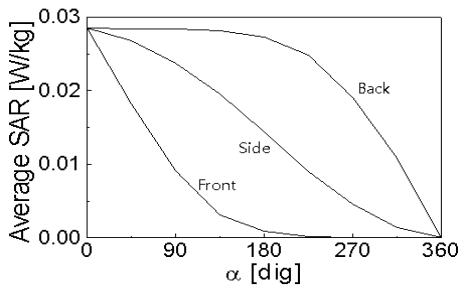
(a) TM파



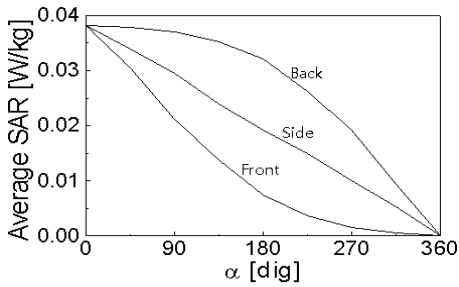
(b) TE파

[그림 7] 피복각도에 대한 평균 SAR (300[MHz])

그림 8에 1.5[GHz]에 대해 (a)가 TM파, (b)가 TE파의 결과를 표시하였다. TM파 Front의  $\alpha = 90^\circ$ 에서 30%의 감소를 확인할 수 있으며,  $\alpha = 180^\circ$ 이 다 다르다면 5% 미만으로 감소하고 있다. 여기에 비해 TE파 Front의  $\alpha = 90^\circ$ 의 결과는 55% 정도로 TM파에 비해 저감효과가 떨어지는 것을 알 수 있다. Back의 경우는 300[MHz]에서와 같이 TE파의 SAR 저감효과가 상승하는 경향을 보이고 있다. 따라서 1.5 [GHz]에서도 회절파의 영향을 고려할 필요가 있음을 알 수 있다.

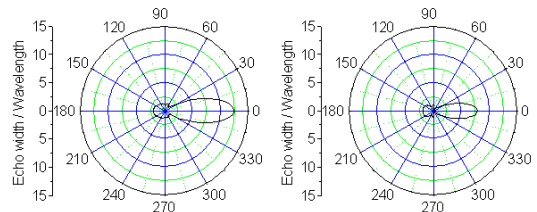


(a) TM파



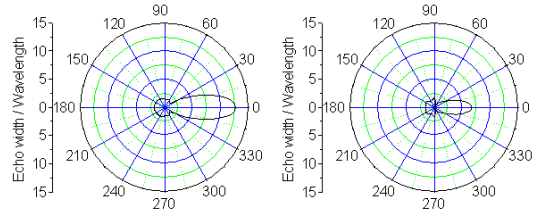
(b) TE파

[그림 8] 피복각도에 대한 평균 SAR (1.5[GHz])



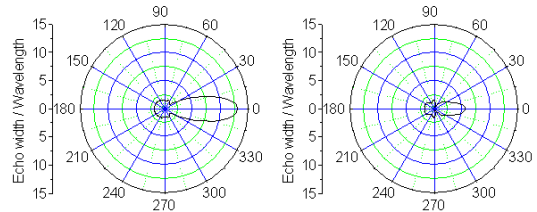
(a)  $\alpha=90^\circ$  TM파

(a)  $\alpha=90^\circ$  TE파



(b)  $\alpha=180^\circ$  TM파

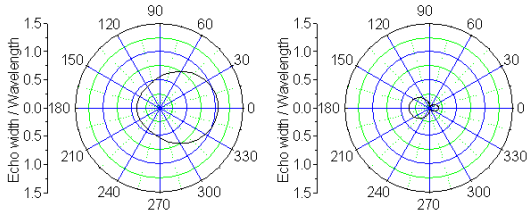
(b)  $\alpha=180^\circ$  TE파



(c)  $\alpha=270^\circ$  TM파

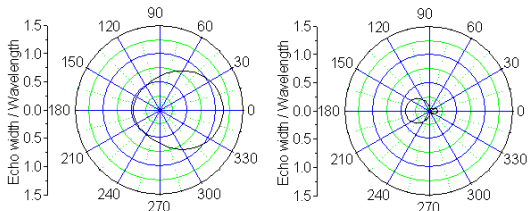
(c)  $\alpha=270^\circ$  TE파

[그림 10] 산란패턴 (1.5[GHz])



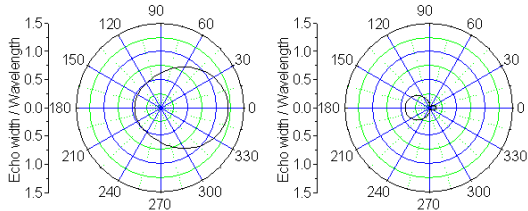
(a)  $\alpha=90^\circ$  TM파

(a)  $\alpha=90^\circ$  TE파



(b)  $\alpha=180^\circ$  TM파

(b)  $\alpha=180^\circ$  TE파



(c)  $\alpha=270^\circ$  TM파

(c)  $\alpha=270^\circ$  TE파

[그림 9] 산란패턴 (300[MHz])

인체와 차폐 쉴드로 인한 산란파를 알아보기 위해 300[MHz] 산란패턴을 그림 9에, 1.5[GHz] 산란패턴을 그림 10에 나타내었다. 그림 9의 TM파의 경우 산란파가 전반적으로 퍼져나가며, 특히 측방( $\phi = 90^\circ, 270^\circ$ )과 후방( $\phi = 0^\circ$ )으로 크게 산란되는 것을 알 수 있다. TE파는 반대로 전방( $\phi = 180^\circ$ ) 방향으로 크게 산란되고 있으나, 크기는 TM파에 비해 작음을 알 수 있다. 또한  $\phi = 75^\circ, 315^\circ$ 에서는 산란이 거의 없음을 확인 할 수 있다. 그림 10의 패턴에서 TM파의 경우 측방( $\phi = 90^\circ$ )에서 비교적 높은 레벨의 사이드 루프를 볼 수 있으나,  $\phi = 60^\circ, 300^\circ$  방향에서는 거의 산란하지 않음을 확인 하였다.

이상의 결과에서 산란파를 억제하기 위해서는 차폐의 피복 각도가 작은  $\alpha = 90^\circ$ 가 적당하지만, SAR을 고려한다면 큰 피복각도가 유리함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

2개의 원통형 인체모델에 대한 SAR과 완전도체 차폐에 따른 SAR 저감효과의 유효성을 확인할 수 있었다.

그 결과 2개의 원통형 인체모델에 대한 SAR은 한 개 모델로 계산한 결과에 비해  $f = 300[\text{MHz}]$ 에서 최대 1.5배,  $f = 800[\text{MHz}]$ 에서 2배 정도로 가능할 수 있음을 분석하였다. 원통형 모델에 대한 계산은 원주라는 구조상 쉽게 공진이 일어나는 조건이므로, SAR의 상승률 결과에 대해 실제 값으로 사용할 수는 없으나 최악의 경우에 대한 기준으로 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

그리고 완전도체에 의해 차폐된 모델에 평면파를 입사시킨 경우의 평균 SAR은 차폐하지 않은 경우에 비해 TM파에서 약 1/10 이하로, TE파의 경우 약 1/3 이하로 감소되어 차폐의 유효성을 확인할 수 있었다. 그러나 차폐의 피복범위가 클수록 SAR 저감효과가 상승하지만 산란파의 레벨이 증가하기 때문에 전자파 면역 실험 등에서는 피측정물의 배치에 대한 검토에 신중해야 함을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

[1] 電氣學會高周波電磁界の生体効果に關する計測技術調査専門委員會編(1995). 電磁界の生体 効果と計測. コロナ社.

[2] 赤尾保男 (1991). 環境電磁波工學の基礎. 電子情報通信學會.

[3] 加藤晃, 藤原修 (1992. 10). 頭部の3次元リアルモデルにおけるマイクロ波の比吸収率分布. 電子情報通信學會技術研究報告, EMCJ92-48.

[4] 鉦野秀三, 國分鐵智 (1987). 円柱モデルによる複数人体の吸収電力. 電氣關係學會東北支部連合大會, 2B19.

[5] 鉦野秀三, 國分鐵智 (1988). 多層円柱モデルによる複数人体の吸収電力. 電子情報通信學會春季全國大會, B-300.

[6] O. P. Gandhi, et al. (Nov.-Dec.1979). Part-body and multibody effects on absorption of radio-frequency electromagnetic energy by animals and by models of man. Radio Sci., 14, 6s, pp15-21.

[7] IEEE Standard. Safety levels with perfect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3kHz to 300MHz. IEEE C.59-1991.

[8] IEC/TC 106/84/FDIS (2005). Procedure to measure

the specific absorption rate(SAR) in the frequency range of 300 MHz to 3 GHz - Part 1: hand-held mobile wireless communication devices.

[9] Durney C. H. (January 1980). Electromagnetic Dosimetry for Models of Humans and Animals: A Review of Theoretical and Numerical Techniques. Proc. IEEE, 68, 1, pp33-40.

[10] 安達三郎, 澤谷邦男, 宇野亨, 大沼豊 (1988). 無限円柱人体モデルとダイポールアンテナの電磁相互作用. 電子情報通信學會創立70周年記念總合全國大會 585.

[11] J. H. Richmond (1965). Scattering by a dielectric cylinder of arbitrary cross section. IEEE Trans., AP-13, 3, pp334-341.

[12] 細野敏夫, 日向隆, 岡田浩二 (1972). 円筒回折格子における平面電磁波の散亂. 電子情報通信學會技術研究報告, AP72-43.

## 양 준 원



- 1989년 : 영남대학교 전자공학과(학사)
- 1995년 : 慶應義塾大學校 電氣工學科(석사)
- 1995년 ~ 1998년 : 慶應義塾大學校 電氣工學科(박사과정 수료)
- 1999년 ~ 현재 : 대불대학교 컴퓨터

교육과 부교수

- 관심분야 : EMI/EMC, antenna, electro-magnetic waves, e-러닝
- E-Mail : jwyang@db.ac.kr

## 김 형 호



- 1989년 : 경희대학교 전자계산공학과(학사)
- 1992년 : 경희대학교 전자계산공학과(석사)
- 1994년 ~ 1997년 : 慶應義塾大學校 計算機科學科(박사과정 수료)
- 1998년 ~ 현재 : 대불대학교 컴퓨터

교육과 부교수

- 관심분야 : 신경회로망, 컴퓨터구조, e-러닝
- E-Mail : hhkim@db.ac.kr