

# FDTD 방법을 이용한 복잡한 구조물에서의 전자파 침투 특성 해석

## Analysis of EM Penetration Problems in Complex Structures Using Finite-Difference Time-Domain Method

김병남\* · 채찬병\* · 박성욱\* · 이형수\*\*

Byoung-Nam Kim\* · Chan-Byoung Chae\* · Seong-Ook Park\* · Hyung-Soo Lee\*\*

### 요 약

본 논문에서는 PML 흡수 경계 조건을 만족하는 FDTD법을 이용하여 안테나의 방사 특성 및 EM penetration 문제를 해석하였다. 실린더 위에 탑재된 짧은 모노폴 안테나의 경우 far-field에서의 주 방사 성분인  $E_\theta$  ( $\varphi = 90^\circ$ )에 대하여, 본 논문에서 제안된 FDTD 해석 결과와 Carter에 의한 정확한 해석적 방법<sup>[1]</sup>과 서로 비교해 보았으며 그 결과 두 해석 방법에 의한 결과 값이 서로 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

또한 이렇게 검증된 본 FDTD법을 이용하여 헬기와 같은 복잡한 구조물에서의 EM penetration 문제를 해석하였다. 헬기의 외부에서 평면파가 입사함에 따라 헬기 내부로 침투되는 전자파 특성을 고찰하였다. 해석 결과, 헬기의 창문 및 측면 출입구를 통하여 입사 전자파의 대부분이 침투되는 특성을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we analyzed the radiation patterns of a monopole antenna mounted on cylinder and EM penetration problems in the complex structures by using FDTD method associated with 3-D PML absorbing boundary condition. In order to validate the proposed FDTD code, the radiation patterns of monopole antenna mounted on cylinders were compared with the exact Carter's solutions. As a results, the predicted radiation pattern exhibited excellent agreement with exact solution.

And the FDTD code is applied to analyze the EM penetration problems in complex structures, Blackhawk helicopter. As the plane wave is excited, a significant amount of energy penetrates the helicopter structure, and it is dependent on aperture/airframe interface.

### I. 서 론

전자 산업의 급속한 발달과 더불어 각 산업분야에서의 자동화 시스템에 대한 전자 산업의 응용 추세는 점점 증가하고 있는 가운데 특히, 항공 산업 분야의 경우 전자 장비의 역할은 생명과 직결되는 매우 중요한 역할을 하게 된다. 군사용 항공기뿐만 아

니라 민간 항공기의 경우 엔진, 연료 계통, 센서 등을 제어하기 위해 첨단 디지털 전자 장비를 이용하고 있다. 그러나 이러한 항공기에 탑재된 전자 장비의 경우 외부의 작은 전기적 섭동(perturbation)에도 영향을 받기 쉬운 특성을 가지며 현대와 같이 고밀도 집적된 전자 회로를 이용한 초고속 디지털 전자 장비의 경우 이러한 외부 전자파의 영향에 따

\* 한국정보통신대학원대학교(Information and Communications University)

\*\* 한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute)

· 논문 번호 : 991208-09S

· 수정완료일자 : 2000년 1월 13일

라 전자 장비의 동작에 심각한 오동작을 일으킬 수 있다. 항공기에 탑재된 전자장비의 경우, 기본적으로 우주에서부터 자연적으로 발생하는 자연적인 잡음 전자파나 번개 등에 노출되어 있을 뿐만 아니라 인위적인 고출력의 방해 전자파에 의해 항공기가 공격당할 경우 전자 장비의 작동에 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 따라서 이러한 문제점에 의해 근래에 외국에서는 외부 전자파가 비행체 내부로 침투함에 따른 기타 장비에 미치는 영향을 활발히 연구하고 있으며, 특히 전투기 중 방해 전자파에 의해 공격당할 위험성이 매우 높은 헬기를 중심으로 연구가 시도되고 있다. 이에 따라 최근에 AH-64A 아파치 헬기 구조에 대한 전자파 침투 특성 해석 결과<sup>[2]</sup>와 7대 1로 축소된 NASA 모델의 헬기에 대한 전자파 침투 특성 해석 결과<sup>[3],[4]</sup> 등이 현재 보고되고 있다.

따라서 본 논문에서는 3차원의 PML (Perfectly Matched Layer)<sup>[5]~[7]</sup> 흡수 경계 조건을 만족하는 FDTD 기법을 사용하여 안테나의 방사 특성 및 블랙호크 헬기와 같은 대형 구조물에서의 전자파 침투 특성에 대한 해석을 시도하였다. 블랙호크 헬기와 같은 입의 복잡한 대형 구조물을 정확히 모델링하기 위하여 BRL-CAD<sup>[8]</sup>를 사용하였으며, 이 구조물의 mesh 생성을 위하여 mesh generation tool인 Anastasia<sup>[9]</sup>를 이용하여 격자 분할하였다. 이렇게 격자 분할된 대상체에 대하여 제안된 FDTD 코드를 적용하여 블랙호크 헬기에 대한 전자파 침투(penetration) 특성을 고찰하였다. 해석 결과, 수직 편파된 평면파가 다양한 각도로 입사되었을 때 실제 입사 각도에 큰 관계없이 비행기 창문 및 측면 출입구를 통하여 입사 전력의 대부분이 헬기의 본체로 침투되는 것을 확인할 수 있었다.

## II. 본 론

2-1 짧은 모노폴 안테나의 방사 패턴 해석을 통하여 제안된 FDTD 코드의 검증

2-1-1 Carter 정리에 의한 짧은 모노폴 안테나의 방사특성 해석

무한 길이의 실린더 구조물에 대한 Carter<sup>[1]</sup>의 수

학적 해석 방법은 원통형 도체 구조물위에 부착된 짧은 모노폴 안테나의 방사 특성에 대한 정확한 해를 얻을 수 있는 대표적인 방법이다. 이 방법은 무한 길이의 실린더 표면 위에 안테나가 다양하게 배열되어 분포할 때 각 안테나에 대한 원거리장에서의 방사 특성을 효과적으로 계산하는 방법으로 가역 정리(Reciprocity theorem)를 사용함으로써 Fourier-Bessel 급수항의 계산 과정에서 나타나는 무한 적분을 회피하도록 정리되었다. Carter의 해석 방법을 이용하여 그림 1과 같은 구조에서 반경  $a$ 의 실린더 표면 위에 단일 안테나가 탑재되어 있으며, 다만 길이가 무한한 경우에 대한 far-field 전계 강도,  $E_\theta(\phi=90^\circ)$ 는 식 (1)과 같이 정리할 수 있다.

$$E_\theta = \frac{Idl}{\pi^2 akr} e^{-jkr} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{nj^n \sin(n\theta)}{H_n^{(2)}(ka)} \quad (1)$$

여기서  $H_n^{(2)}(ka)$ 는 제 2종 Hankel 함수의  $n$ 차승을 나타낸다.

2-1-2 FDTD 방법에 의한 짧은 모노폴 안테나의 방사특성 해석

본 논문에서는 3차원 PML 흡수 경계 조건을 만족하는 FDTD 방법을 사용하여 그림 1의 구조와 같

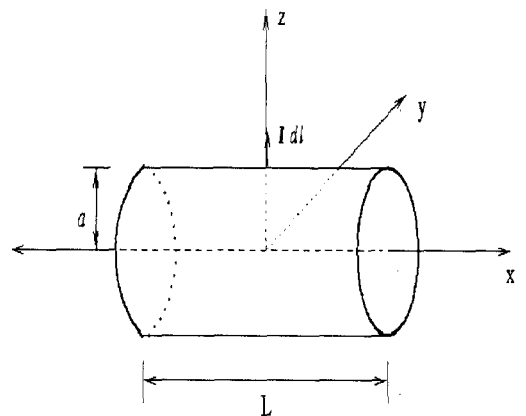


그림 1. 길이 L의 유한한 실린더 구조물 위에 탑재된 짧은 모노폴 안테나

Fig. 1. Short monopole antenna on a finite cylinder with length L.

이 실린더의 반경  $a$ 는 25 cm, 길이  $L$ 이 200 cm의 값을 갖는 유한한 실린더 구조에 대한 안테나 방사 특성을 해석하였다. 와이어 안테나의 급전 방법으로는 동축 선로 급전 방법을 이용하였으며 와이어 안테나의 여기 방법으로는 동일 평면에 있는 와이어 주변의 4개 셀에 안테나에 대한 법선 방향의 방사형 전계를 분포시켜 야기시키는 방사형 전계 급전 방법 (Radial Electric Feed Method)<sup>[10],[11]</sup>을 이용하였다. 해석을 위해 격자 분할된 실린더 구조는 단일 셀의 크기가 2.5 cm의 정방형 크기를 가지며, 전체 time step은 총 350 steps이며, PML layer 층은 4개, reflection factor는  $1.0 \times 10^{-6}$  이하이고 입력 신호는 300 MHz의 단일 주파수를 사용하였다.

그림 2는 상기의 Carter 정리를 이용한 해석 결과와 본 FDTD법을 이용한 해석 결과를 상호 비교하여 나타낸 것이다. 300 MHz에서  $\lambda/4$ 의 길이를 갖고 25 cm의 반경을 갖는 실린더 위에 짧은 모노폴 안테나가 탑재되어 있을 경우, 실린더의 길이를 각각 2 m, 4 m, 6 m로 변화시킴에 따른  $\phi = 90^\circ$ 에서의 방사 특성 결과를 Carter의 해석 결과와 비교하여 나타내었다. 실린더의 길이가 증가함에 따라 전체 time step도 역시 각각 350, 500, 650으로 증가하

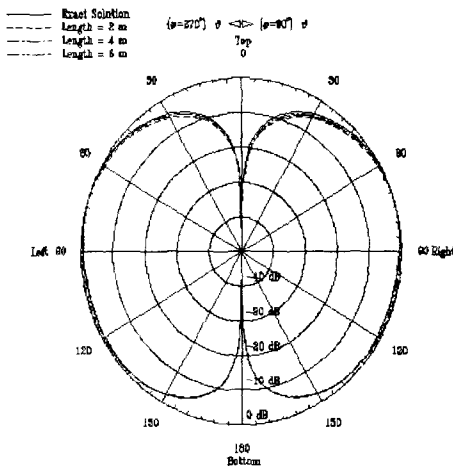


그림 2. 실린더의 길이  $L$ 의 변화에 따른 FDTD 해석 결과와 Carter의 해석 결과와의 안테나의 방사 특성 비교

Fig. 2. Radiation patterns of a monopole antenna on a cylinder to various lengths,  $L$ .

였으며 사용된 PML layer는 6개, reflection factor는  $1.0 \times 10^{-6}$  이하이며 입력 신호는 sinusoidal 함수를 인가하였다. 해석 결과, 본 FDTD법의 결과는 Carter에 의해 유도된 정확한 해석적 결과값에 매우 일치한 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 또한 실린더의 길이를 각각 2 m, 4 m, 6 m로 증가함에 따라 무한 길이에 대한 해석 결과인 Carter에 의한 결과에 점점 더 접근함을 확인할 수 있다.

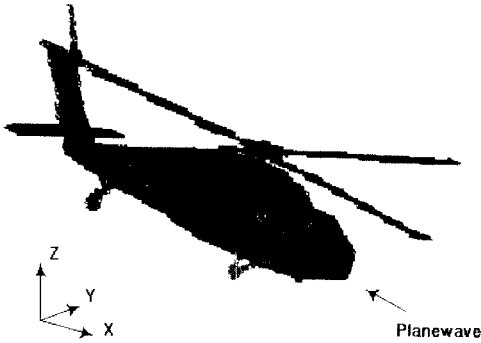
### 2-2 FDTD 방법을 이용한 복잡한 구조물에서의 전자파 침투(penetration) 특성 해석

상기의 FDTD 프로그램 해석 결과와 해석적 계산 방법의 결과값이 서로 매우 잘 일치함에 따라 그 정확성이 검증되었으므로 본 프로그램을 통하여 그림 3의 구조와 같이 좀더 복잡하면서 대형 구조물의 예로 헬기에 대한 전자파 문제를 수행할 수 있다. 해석 모델은 블랙호크 헬기이며, 실제 길이는 15 m, 폭은 3 m, 높이는 약 3.4 m이며 해석의 관심 주파수는 250 MHz이고, 셀 크기는 90 mm ( $\approx \lambda/13$ )로 하였다. 따라서, 전체 셀 개수는  $196 \times 76 \times 70$ 이고 총 time step은 2500, PML layer의 개수는 4개, reflection factor는  $1.0 \times 10^{-6}$  이하이다.

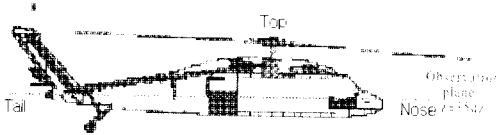
이러한 구조에 대하여 크기가 1 V/m인 수직 편파된 평면파( $E_z, H_y$ )가  $-x$ 방향으로 진행하고 있을 때 헬기 내부로 전파되는 전자파의 특성을 FDTD를 이용하여 해석하였다. 헬기와 같은 복잡한 구조물에서 전자파가 침투되는 특성은 전자파가 입사했을 때 진행 전자파에 노출된 개구 면적, 비행기 동체 구조와 그 재질 특성에 의존하게 된다. 따라서 본 해석에서 고려된 구조로 비행기 외형 모델링의 경우, 비행기 동체 물질은 도전율  $5.75 \times 10^7$  s/m의 도체로 가정하였고, 비행기 전단 및 측면 유리창의 경우 비유전율이 2.7의 강화유리(polycarbonate)의 물질, 그리고 헬기 측면 출입구는 일반적으로 개방된 상태로 비행하기 때문에 개방된 구조에서의 전자파 침투 특성을 해석하였다. 그림 3의 (a)는 실제 헬기의 사진이고, (b)와 (c)는 FDTD 해석을 위해 격자 분할된 헬기 모델이며, 특히 (c)의 경우 실제로 조종사가 탑승하는 위치이면서 또한 비행기에서의 디지털 전자장비들이 많이 탑재되는  $z=35 \Delta z$ 의 위치



(a)



(b)



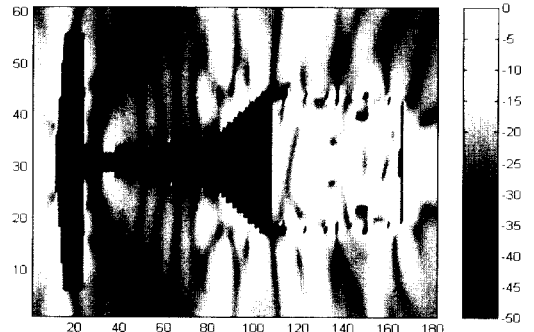
(c)

그림 3. (a) 실제의 블랙호크 헬기 사진, (b) FDTD 방법 해석을 위해 mesh 분할된 블랙호크 헬기 모델의 3D 구조, (c) mesh 분할된 블랙호크 헬기의 측면도

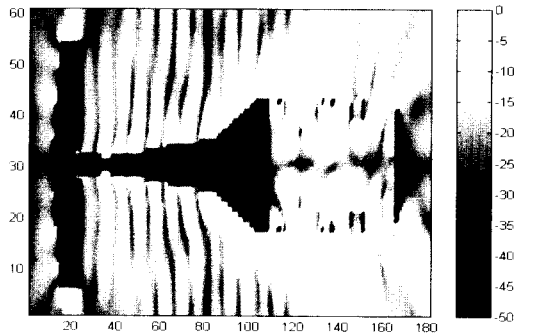
Fig. 3. (a) Picture of Blackhawk helicopter, (b) 3D geometry of FDTD meshed Blackhawk helicopter for FDTD analysis, (c) Side-view of FDTD meshed Blackhawk.

를 잘 나타내고 있다. 따라서, 본 논문에서는 이 cross section면을 기준으로 헬기로 침투된 전계 분포를 고찰하게 된다.

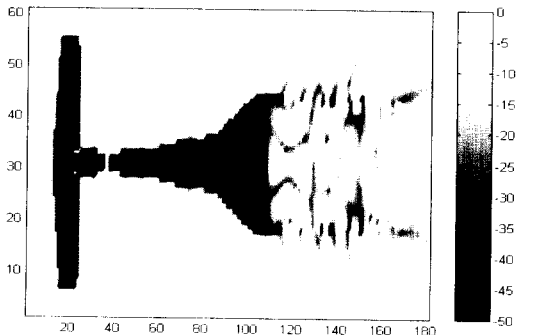
그림 4는 수직 평면과가 헬기에 수평면과 0°의 각도로 입사될 때의 침투된 전계 분포를 관찰한 결



(a)



(b)



(c)

그림 4. 수직 평면과( $E_z$ )가 헬기에 수평면과 0°의 각도로 입사될 때 헬기 내부로 침투되는 전계 분포 : (a)  $E_x$ , (b)  $E_y$ , (c)  $E_z$

Fig. 4. The penetrated electric field distribution in helicopter to vertical polarization( $E_z$ ) excitation with incidence angle 0° above horizontal : (a)  $E_x$ , (b)  $E_y$ , (c)  $E_z$ .

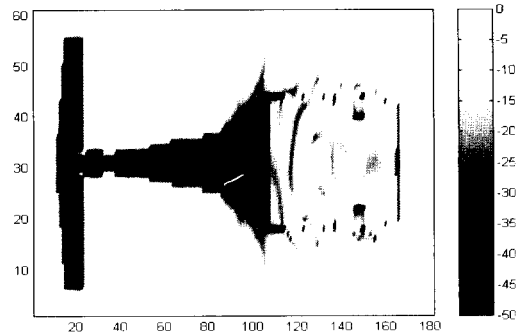
과이다. 전자파가 비행기의 앞쪽에서 입사된 후 비행기의 전단 및 동체에 의해 반사 및 산란되어 시간

이 흐름에 따라 정상상태에 도달된 뒤  $z=35\lambda z$ 인 지점에서의 수평 cross section 단면을 기준으로 전계 분포를 관찰한 결과이다. 그림에서 (a), (b), (c)는 각각 비행기 본체로 침투된 전계 성분 중 각각  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ 에 값을 나타낸다. 특히 비행기의 전단 및 측면 창문이 유리로 되어 있기 때문에 입사된 전자파의 상당량 에너지가 헬기 본체로 침투하고 있음을 확인할 수 있다. 비행기 동체의 개구 면적 및 창문을 통하여 직접 내부로 침투하는 전자파 및 비행기 동체에 의해 산란되어 2차적으로 침투되는 성분이 존재하게 됨에 따라  $x, y, z$  방향의 다양한 전계 성분들이 헬기 내부로 침투하여 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 입사된 평면파가 수직 평면파인  $E_z$  성분임에 따라 그림 (c)에서 볼 수 있는 것과 같이 약  $-5 \sim -10$  dB 정도의 분포로  $E_z$  성분이 가장 우세하며,  $E_x, E_y$ 의 경우 본체 내로 침투하는 전계의 세기는 약  $-10 \sim -15$  dB 정도로 상대적으로 작은 값을 나타내고 있다.

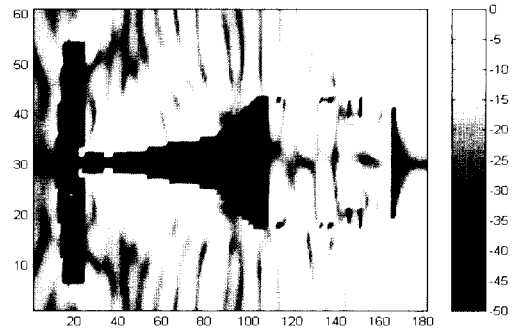
그림 5의 경우 수직 평면파가 헬기에 수평면과  $45^\circ$ 의 각도로 입사될 때의 헬기의 내부로 침투된 전계 분포를 관찰한 결과이다. 수평면과  $45^\circ$ 의 각도로 입사함에 따라  $E_x$ 와  $E_z$  성분의 경우 모두 헬기 외부에서는 진행파의 형태로 대부분 진행되고 있는 것을 확인할 수 있다. 반면 입사 전자파가  $45^\circ$ 의 기울기를 가지고 입사함에 따라 헬기로 침투되는 전계는 벡터 성분의 의존하게 되고  $E_x$ 와  $E_z$ 의 경우 비슷한 크기로 침투되는 특성을 나타내고,  $E_y$  성분이 다소 감소된 특성을 보여주고 있다.

그림 6의 경우 수직 평면파가 헬기에 수평면과  $0^\circ$ 의 각도로 입사되고, 헬기의 창문이 도체로 덮혔을 때 헬기 내부로 침투된 전계 분포를 해석한 결과이다. 비행체의 전면 및 측면 유리를 도체로 대체하였을 경우 전면을 통하여 침투되는 전자파는 차단시켰지만 측면의 출입문을 통하여 침투하는 전자파는 차단시키지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 특히 옆 출입구가  $y$ 축 방향으로 나 있음에 따라  $E_y$  성분이 가장 우세하게 관측되고 있음을 알 수 있다.

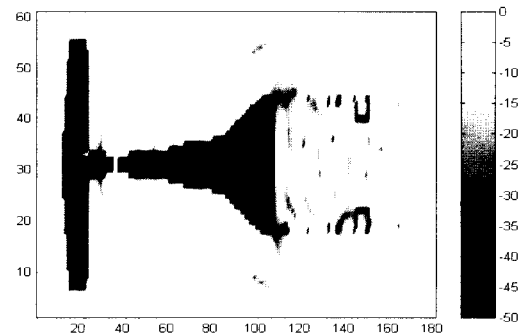
헬기 본체 내로 침투하는 전계의 세기는 입사각의 각도, 비행체 본체의 개구 구조 및 물질 특성에 따라 의존하게 된다. 특히 이러한 의존성은 침투된 전계의 벡터 성분과도 밀접한 관계를 가짐을 확인할



(a)



(b)

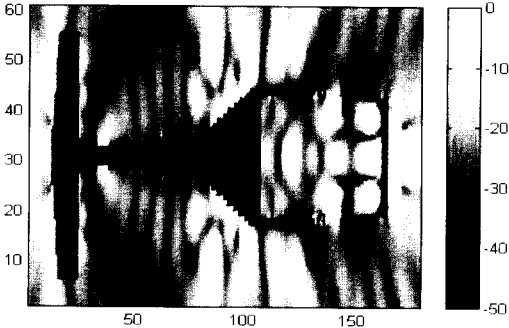


(c)

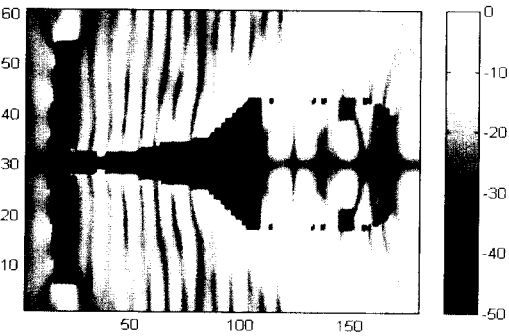
그림 5. 수직 평면파( $E_z$ )가 헬기에 수평면과  $45^\circ$ 의 각도로 입사될 때 헬기 내부로 침투되는 전계 분포 : (a)  $E_x$ , (b)  $E_y$ , (c)  $E_z$

Fig. 5. The penetrated electric field distribution in helicopter to vertical polarization ( $E_z$ ) excitation with incidence angle  $45^\circ$  above horizontal : (a)  $E_x$ , (b)  $E_y$ , (c)  $E_z$ .

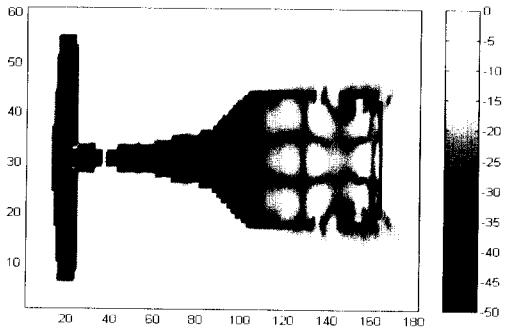
수 있다. 비행기 유리가 비유전율 2.7의 polycarbonate 강화유리로 되어 있을 때 입사각도에 따른 전자파 침투 특성을 전체적으로 고찰해 본 결과, 입



(a)



(b)



(c)

그림 6. 수직 평면파( $E_z$ )가 유리창이 도체로 덮힌 헬기에 수평면과  $0^\circ$ 의 각도로 입사될 때 헬기 내부로 침투되는 전계 분포 : (a)  $E_x$ , (b)  $E_y$ , (c)  $E_z$

Fig. 6. The penetrated electric field distribution in helicopter with metal-covered window to vertical polarization ( $E_z$ ) excitation with incidence angle  $0^\circ$  above horizontal : (a)  $E_x$ , (b)  $E_y$ , (c)  $E_z$ .

사각의 각도에 관계없이 대부분 헬기의 창문 및 측

면 출입구를 통하여 전자파가 본체 내로 침투되고 내부로 침투되어 진행되는 전자파는 진행 거리가 증가할수록 그 크기가 점점 감소되는 특성을 확인할 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 PML 흡수 경계 조건을 갖는 FDTD법을 이용하여 복잡한 대형 구조물에 대한 전자파 침투 특성을 해석하였다. 논문에 사용된 FDTD법의 타당성을 검증하기 위해 실린더 위에 놓인 짧은 모노폴 안테나의 방사 특성에 대한 기존의 정확한 수학적 계산 방법인 Carter의 정리 결과와 비교하였으며 그 결과, 두 경우가 매우 잘 일치함을 확인하였다.

또한, 이렇게 검증된 FDTD 코드를 이용하여 블랙호크 헬기와 같은 대형 구조물에 대하여 전자파가 외부에서 입사될 때 헬기 내부로 침투하는 전자파의 크기를 해석하였다. 해석 결과, 수평면과 이루는 입사각에 관계없이 대부분의 전계 ( $E_z$ )가 침투되고 있음을 확인하였다. 이러한 전자파의 침투 영향은 헬기 내부에 탑재된 고밀도 집적된 전자 장비에 직접적인 영향을 주게 되므로 전자파 차폐를 위한 문제 해결이 시급한 상황이다. 또한 전자파의 침투 정도는 비행기의 구조, 창문의 크기와 물질 특성, 그리고 비행기 동체의 형태와 그것을 구성하고 있는 물질 특성에 의존하게 되므로 구조적 최적화 방법과 효과적인 전자파 차단을 위한 재료적 접근 방법 등의 다양한 방법을 통한 문제 해결이 중요하다.

본 논문의 해석 결과는 실제로 전자전의 시대가 도래함에 따라 외부의 고출력 전자파가 비행체 내로 침투함에 따른 내부의 전자장비들에 미치는 방해 특성을 고찰하기 전 단계로서, 비행체 내부의 각 위치에 따른 전자파 침투량을 정량적으로 고찰해 봄으로써 차후 이러한 복잡한 구조물에서의 전자파 차폐 문제 해결에 있어서 충분한 가이드라인을 제공할 수 있으리라 기대된다.

### 참 고 문 헌

[1] P. S. Carter, "Antenna Arrays Around Cyl-

inders." *Proceedings of the I.R.E.*, Dec., 1943, pp. 671-692.

[2] C. A. Balanis and P. A. Tirkas, "Image reconstruction for EM penetration and interference." *IEEE Digital Signal Processing Proceedings, 1997. DSP 97*, pp. 907-909.

[3] P. A. Tirkas, J. Peng, C. A. Balanis and G. C. Barder, "Electromagnetic interference and interaction with complex helicopter structures." *IEEE Military Communication Conference, 1994. MILCOM '94*, vol. 1, pp. 12-16.

[4] P. A. Tirkas and P. A. Balanis, "High intensity radiated field (HIRF) penetration in helicopters." *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1995, AP-S*, vol. 1, pp. 376-379.

[5] J. P. Berenger, "A Perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *J. Computational Phys.*, vol. 114, no. 2, Oct., 1994, pp. 185-200.

[6] D. D. Katz, E. T. Thiele, and A. Taflove, "Validation and extension to three dimensions of the Berenger PML absorbing boundary condition for FD-TD Meshes," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 4, Aug., 1994, pp. 268-270.

[7] R. Mittra and U. Pekel, "A new look at the perfectly matched layer (PML) concept for the reflectionless absorption of electromagnetic waves," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 5, Mar., 1995, pp. 84-86.

[8] "BRL-CAD User's Manual," vol. IV, Rel. 4.0, The Ballistic Research Laboratory, Dec., 1991.

[9] G. Laguna, "Anastasia: A solid model based 3D Finite Difference Mesh Generator," Lawrence Livermore National Laboratory, Oct., 1990.

[10] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press, 1993.

[11] L. L. Tsai, "A numerical solution for the near and far fields of an annular ring of magnetic current," *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol. 20, Sept., 1972, pp. 569-576.

김 병 남



1992년 2월: 아주대학교 전자공학과(공학사)  
 1998년 2월: 아주대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 1998년 3월~현재: 한국정보통신대학원대학교 박사과정 재학중  
 [주 관심분야] FDTD법을 이용한

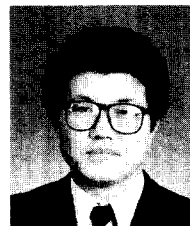
초고주파 구조물 해석, 광대역 안테나 설계, 초고속/고밀도 반도체 소자의 회로 설계 및 최적 패키징 등임.

채 찬 병



1999년 2월: 아주대학교 전자공학부(공학사)  
 1999년 3월~현재: 한국정보통신대학원대학교 석사과정 재학중  
 [주 관심분야] 초고주파 및 안테나, 전자장 수치해석

박 성 욱



1987년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)  
 1989년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)  
 1993년 3월: 한국통신인력개발본부  
 1997년 3월: Arizona State University, Electrical Engineering(공학박사).

1997년 9월~현재: 한국정보통신대학원대학교 조교수  
 [주관심분야] 광대역 적층형 안테나 설계, 초고주파 회로 설계, M/W, mm-wave 대역용 고속 반도체 소자의 전자 패키징, 전자장 수치 해석 기법 등임

이 형 수



1980년: 경북대학교 전자공학과(공학사)

1985년: 연세대학교 전자계산학과(공학석사)

1995년: 성균관대학교 정보공학과(공학박사)

1983년~현재: 한국전자통신연구원

책임연구원

[주 관심분야] 전파전파 특성, 스펙트럼 관리기술, 무선망 설계