

論文99-36D-12-1

FDTD 기법을 이용한 복잡한 구조물 위에 부착된 안테나의 방사특성 해석

(Radiation study of a Wire Antenna Mounted on the
Complex Structure Using the FDTD Method)

金炳南*, 朴星昱*

(Byoung-Nam Kim and Seong-Ook Park)

요 약

본 논문에서는 3차원의 PML 흡수 경계 조건을 갖는 FDTD법을 이용하여 복잡한 구조물 위에 부착된 안테나 해석 방법을 수행하였다. 본 연구에서 제안된 FDTD법의 타당성을 검증하기 위해 실린더 구조 및 구 구조 위에 짧은 모노폴 안테나가 탑재됨에 따른 안테나 방사 특성의 해석에 대해 정리한 Carter^[1] 및 Harrington^[2]에 의한 정확한 수학적 해석 방법과 상호 비교하였다. 비교 결과, 제안된 FDTD법 해석 결과는 기존의 정확한 수학적 풀이 방법과 매우 잘 일치함을 확인하였다.

이러한 검증된 FDTD 해석 기법을 이용하여 복잡한 구조에 대한 정확한 구조적 모델링을 할 수 있는 전문적인 CAD 툴을 결합하여 블랙호크 헬기과 같은 복잡한 대형 구조물에 부착된 안테나 해석을 수행하였다.

Abstract

In this paper, we analyzed the radiation patterns of a monopole antenna mounted on 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 and spheres were compared with the exact solutions of Carter^[1] and Harrington^[2]. For all case considered, the predicted radiation pattern exhibited excellent agreement with exact solution.

To be able to model the more complex structures, the proposed FDTD methods are combined with BRL-CAD. And this procedures is applied to predict the radiation patterns of a wire antenna attached to the top of a Blackhawk helicopter.

I. 서 론

1980년대 후반까지 다양한 초고주파 구조물에 대한

복사와 산란 특성을 해석하는 데에는 크게 두 가지 방법이 사용되어 왔다. 첫 번째 방법은 MoM(Method of Moments) 해석 방법과 같이 주파수 영역에서의 적분 방정식을 푸는 방법이 그 대표적인 예이다. 그러나 이 방법은 불행히도 대상 구조물이 복잡해지거나 전기적인 길이가 매우 커지게 되면 계산이 어려워지거나 또는 계산에 소요되는 시간이 비효율적으로 크게 증가하게 된다. 특히, 대상물의 도체가 완전도체(PEC)가 아닐 경우 계산이 더욱 어려워지는 단점이 있다. 이에 반하여 다른 개념으로 접근하는 두 번째 방법으로는 GTD(Geometrical Theory of Diffraction) 방법이나

* 正會員, 韓國情報通信大學院大學校

(School of Engineering, Information and Communications University)

※ 본 연구는 Arizona State Univ.의 Telecommunication Reserch Center와 연계하여 수행되었음.

接受日字: 1999年9月9日, 수정완료일: 1999年11月15日

UTD(Uniform Theory of Diffraction) 및 MEC(Method of Equivalent Currents) 등을 이용하는 방법들이 사용되었다. 그러나, 이 방법들은 높은 주파수에서는 좋은 해석 결과를 보여주고 있으나 전기적 길이가 작아지는 낮은 주파수에서의 해석 결과에는 상대적으로 정확도가 떨어지는 결과를 나타낸다. 또한 복잡한 구조에 대한 해석이 용이하지 못하고 MoM 방법과 마찬가지로 불완전 도체에 대한 특성 해석에는 매우 어려운 문제로 앞으로 해결해야 될 문제이다.

반면 근래에 Maxwell 방정식을 시간 영역에서 그 해를 구하는 방법인 유한차분 시간영역(FDTD; Finite Difference Time Domain)^[3-6]의 해석 방법이 널리 사용되어 지고 있다. 이러한 FDTD법의 해석 방법은 그 기본 알고리즘의 간단성과 다양한 구조에 대한 적용성이 뛰어나고 계산 능력이 우수하다는 특징으로 그 사용이 널리 확대되고 있는 상황이다.

본 논문에서는 이러한 FDTD법의 장점에 따라 3차원의 PML(Perfectly Matched Layer)^[7-9] 흡수 경계 조건을 만족하는 FDTD 기법을 사용하여 블랙호크 헬기와 같은 대형 구조물에 대한 수치해석을 시도하였다. 블랙호크 헬기와 같은 임의의 복잡한 대형 구조물을 정확히 모델링하기 위하여 BRL-CAD^[10]를 사용하였으며, 이 구조물의 mesh 생성을 위하여 mesh generation tool인 Anastasia^[11]를 이용하여 적절한 격자 크기로 mesh 분할하였다. 이렇게 격자 분할된 대상체에 대하여 제안된 FDTD 코드를 적용하여 복잡한 구조물에 대한 전자기장 해석을 수행하였다. 그림 1은 이러한 수행 과정의 절차를 간략히 도시화한 것이다.

본 논문에서는 실린더 구조, 도체 구 및 블랙호크 헬기와 같은 복잡한 구조에 대한 안테나의 방사 특성을 해석하였다. 각 구조물에 탑재된 안테나의 경우 짧고 얇은 와이어 안테나로 가정하였고, 이러한 안테나의 급전 방법으로는 동축 선로 급전 모델을 이용하였다. 또한 헬기의 외형은 해석의 편의상 모두 도체로 가정하였다. 해석 결과, 제안된 FDTD법 해석 방법은 기존의 정확한 수학적 풀이 방법과 매우 잘 일치함을 확인하였다. 특히 블랙호크 헬기의 해석 결과로는 헬기의 주 회전날개 회전 방향에 따라 안테나의 방사 특성이 많은 영향을 받는 것으로 확인되었다.

현대와 같이 전자 산업이 국가의 산업 경쟁력 강화라는 점 이외에도 전세계적으로 다양한 국지전의 발발 가능성이 증가함에 따라 이제 국가 안보의 생존권 보

존 차원에서 국내의 군사 통신에 대한 민·간 기술교류 협력이 활성화되는 것이 무엇보다도 시급한 시점이다. 따라서, 이러한 시기에 본 연구의 결과는 중요한 군사 통신의 기반 자료로 활용될 뿐 아니라 기타의 민간 항공기를 이용한 통신 자료로서 유용히 사용될 수 있으리라 기대된다.

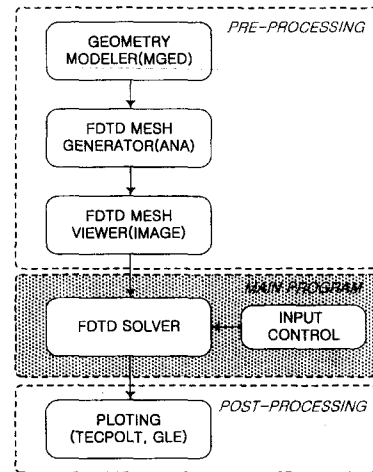


그림 1. 복잡한 구조물의 FDTD법 해석의 순서도
Fig. 1. Flow chart of FDTD method for complex structures.

II. FDTD 기법을 이용한 실린더 및 도체 구의 해석

우선 본 논문에서 제안된 FDTD 법의 타당성을 검증하기 위해 안테나가 탑재된 다양한 곡면 구조에 대하여 기존의 해석 방법과 비교하였다. 고려된 구조로는 각각 안테나가 탑재된 유한 길이의 실린더 구조와 도체 구의 구조이며, 이 구조의 해석 방법으로는 기존의 수학적 계산 방법 값과 본 FDTD 법 계산 방법의 값을 각각 비교, 검토하였다. 실린더의 표면은 완전 도체로 가정하였고, 안테나의 길이는 매우 짧은 모노폴 안테나의 경우 또는 길이 d 의 스텐브(stub) 구조를 갖는 경우로 가정할 수 있으며 곡면에 법선 방향으로 탑재되어 있다. 실린더 및 구면과 같이 곡률 반경을 갖는 구조를 FDTD로 해석함에 있어서 계산 영역을 실제의 대상체 구조에 가깝게 모델링하는 것이 바로 계산 오차를 줄이는 매우 중요한 요소이다. 특히, 모노폴 안테나가 급전되는 영역의 근처인 곡면의 top-layer에서는 셀

의 개수에 따른 접지면의 크기가 안테나 급전부의 모델링 및 안테나의 방사 특성에 영향을 미치므로 정확히 고찰해 볼 필요가 있다. 또한 해석 대상체를 mesh 분할했을 경우, 각 셀의 크기를 사용 파장과의 관계를 고려해 최적으로 결정하는 것도 중요한 문제이다. 이러한 문제들은 제한된 시스템의 성능을 가지고 방대하거나 매우 복잡한 구조물에 대한 FDTD 해석을 할 때 계산 시간의 효율성과 계산 결과의 정확성을 동시에 극대화할 수 있는 좋은 가이드 라인을 제공할 수 있다.

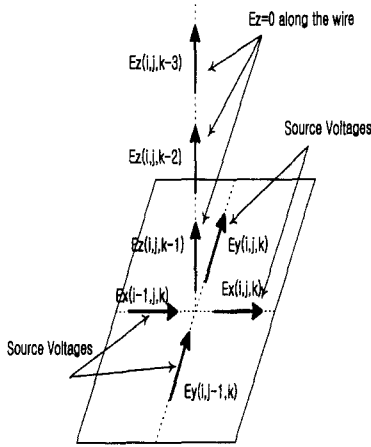


그림 2. 와이어 안테나를 위한 방사형 전계 급전 방법
Fig. 2. Radial electric field method of feeding a wire antenna.

본 논문에서 사용된 와이어 안테나의 급전 방법으로 동축 선로 급전 방법을 이용하였으며 와이어 안테나의 여기 방법으로는 방사형 전계 급전 방법(Radial Electric Feed Method)^{[6],[12]}을 이용하였다. 이 급전 방법은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 이 방법은 동일 평면에 있는 4개 셀의 가장자리에 안테나에 대한 법선 방향의 방사형 전계를 분포시킴으로서 와이어 안테나를 여기시키게 된다. 여기서 E_x 와 E_y 는 다음 식 (1)과 식 (2)의 관계를 갖는다.

$$E_x^n(k, i, j) = -E_x^n(k, i-1, j) = \frac{2V(t)}{\Delta x \ln\left(\frac{\Delta x}{r}\right)} \quad (1)$$

$$E_y^n(k, i, j) = -E_y^n(k, i, j-1) = \frac{2V(t)}{\Delta y \ln\left(\frac{\Delta y}{r}\right)} \quad (2)$$

상기의 식에서 r , Δx , Δy , $V(t)$ 는 각각 와이어 안

테나의 반지름, x 방향의 셀 크기, y 방향의 셀 크기 그리고 소스 전압의 파형을 뜻한다. 만약, $\Delta x = \Delta y = \delta$ 의 조건을 만족한다면 식 (1)과 식 (2)는 식 (3)으로 정리될 수 있다.

$$E_x^n(k, i, j) = -E_x^n(k, i-1, j) = E_y^n(k, i, j) = -E_y^n(k, i, j-1) = \frac{2V(t)}{\delta \ln\left(\frac{\delta}{r}\right)} \quad (3)$$

1. 무한 길이의 실린더 및 도체 구 위에 탑재된 안테나에 대한 정확한 수학적 계산방법

무한 길이의 실린더 구조물에 대한 Carter^[11]의 수학적 해석 방법은 원통형 위에 부착된 짧은 모노폴 안테나의 전체 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 원거리 장에서의 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 3과 같은 구조에서 반경 a 의 실린더 표면 위에 단일 안테나가 탑재되어 있으며, 다만 길이가 무한한 경우 far-field 전계 강도 $E_\theta(\phi = 90^\circ)$ 는 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

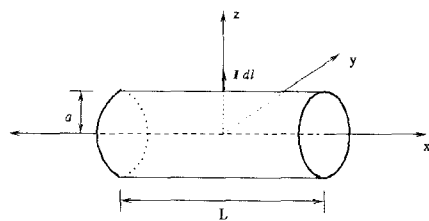


그림 3. 길이 L의 유한한 실린더 구조물 위에 탑재된 짧은 모노폴 안테나

Fig. 3. Short monopole antenna on a finite cylinder with length L.

$$E_\theta = \frac{I_0 l}{\pi^2 a k r} e^{-jkr} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{H_n^{(2)} \sin(n\theta)}{H_n^{(2)}(ka)} \quad (4)$$

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

무한히 긴 실린더의 구조와 비슷한 방법으로 도체

구면 위에 탑재된 안테나에 대한 해석을 Green's function 이나 가역 정리를 이용하여 정확한 수학적 계산을 수행할 수 있다. 이 방법은 Harrington^[2]에 의해 정리되었으며 그림 4의 구조에 적용할 경우 far-field 전계 강도 $E_\theta(\phi=90^\circ)$ 는 식 (5)와 같다.

$$E_\theta = \frac{Idl}{4\pi jkr} e^{-jkr} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{j^n (2n+1)}{\widehat{H}_n^{(2)}(ka)} P_n^1(\cos(\theta)) \quad (5)$$

여기서 $\widehat{H}_n^{(2)}(ka) = kr \cdot h_n^{(2)}(kr)$ 이고 $h_n^{(2)}$ 는 구의 Hankel function이고, $P_n^1(\cos(\theta))$ 는 제1종 Legendre 함수와 관계된 항이다. 식 (4)와 식 (5)와 같이 원거리장에서의 방사 특성을 구하는 이러한 경우, 단지 ka 의 값이 크게 증가할 때만 E_θ 의 값이 각각 완만하게 수렴하게 되는 특성이 나타나고 있음을 예측할 수 있다.

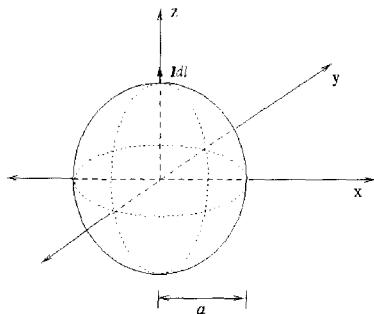
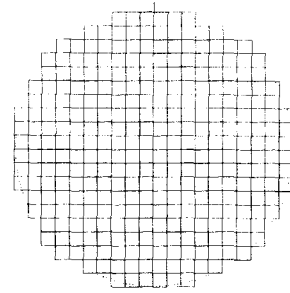


그림 4. 반지름 a 의 도체 구 표면에 부착된 짧은 모노폴 안테나

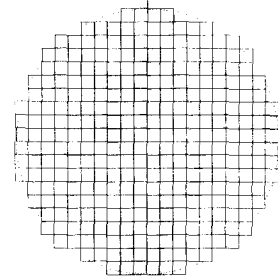
Fig. 4. Short monopole antenna on a sphere with radius a .

2. 유한 길이의 실린더 및 도체 구 위에 탑재된 안테나에 대한 FDTD법 해석 결과

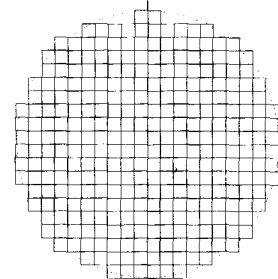
3차원 PML 흡수 경계 조건을 만족하는 FDTD 방법을 반경 a , 길이 L 의 값을 갖는 유한한 실린더 구조에 적용하여 해석하였다. 실린더의 구조에 안테나가 탑재될 경우 안테나에 방사형으로 소스 전계를 야기시키기 위해 필요한 소요 면적의 값을 구하기 위해 실제 모노폴 안테나가 급전되는 영역의 근처 부근 곡면인 top-layer 부분에서의 필요한 최소 접지 면적이 존재하게 되는데 이러한 급전부에 근접된 지역에서의 접지면적을 변화시킴에 따른 안테나의 방사 특성을 해석하였



(a)



(b)



(c)

그림 5. 모노폴 안테나가 탑재된 반경 25cm 크기의 실린더 단면 중 top-layer의 개수에 따른 구조 (a) 6개 셀 배치 구조(CASE I) (b) 4개 셀 배치 구조(CASE II) (c) 2개 셀 배치 구조(CASE III)

Fig. 5. Cross sections of the mesh of the 25cm radius cylinder with different sizes. (a) Six cells of top-layer(CASE I) (b) Four cells of top-layer(CASE II) (c) Two cells of top-layer(CASE III)

다. 해석 대상체인 실린더는 $200\text{ cm}(2\lambda @ 300\text{ MHz})$ 의 길이 L 값을 가지고 있고, 25 cm 의 반경 a 를 갖는 구조이다. 이러한 구조에 대해 단일 셀의 크기가 2.5 cm 의 정방형 크기를 가지며, 다만 top-layer의 개수가 각각 6개(Case I), 4개(Case II), 2개(Case III)의 경우

로 변화할 때 안테나 근처의 접지면 변화에 따른 방사 특성을 고찰하였다. 전체 time step은 총 350 step이며, PML layer는 4개, reflection factor는 1.0×10^{-6} 이하이고 입력 신호는 300 MHz의 단일 주파수의 경우이므로 이에 해당하는 sinusoidal 함수를 입력 신호로 인가하였다. 구조는 각각 그림 5의 (a), (b), (c)와 같은 단면도를 가진다.

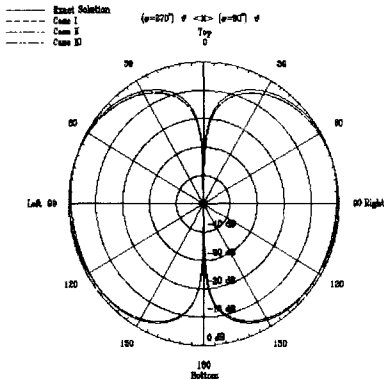


그림 6. 다양한 top-layer의 셀 배치 구조에 따른 안테나의 방사 특성 해석
Fig. 6. Radiation patterns of a wire antenna to various top-layer cell numbers.

그림 6은 그림 5의 각각의 구조물에 대하여 상기의 식 (4)의 수학적 계산 방법 및 본 논문에서 제안된 FDTD 방법을 사용한 해석 결과를 상호 비교하여 나타낸 결과이다. Case I, II, III에 대한 FDTD법의 해석 결과는 서로 매우 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 또한 이러한 해석 결과는 Carter에 의해 유도된 수학적 해석 방법과 비교해 볼 때 매우 정확한 방사 특성 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 다만 θ 가 60° 이하에서의 발생하는 작은 오차의 경우는 실제로 FDTD 방법에서 모델링된 실린더의 구조가 Carter 방법에서 사용된 경우처럼 무한 길이가 아니라 유한한 L의 길이 값을 가짐에 따른 오차에 기인한다. 따라서, 와이어 안테나를 급전시키는데 필요한 접지면적이 그림 5의 Case III와 같이 셀 하나의 크기만으로 둘러 쌓여 있을 경우, 2개 또는 3개로 둘러 쌓여 있을 때와 비교해 보면 방사 특성의 값에는 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다. 그러므로, 와이어 안테나의 급전 부분을 모델링하기 위해 동일 평면에 필요한 접지면의 최소 면적은 단일 셀 크기 정도의 접지면의 반지름 영

역만 형성되면 와이어 안테나 급전에 필요한 최소 면적을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

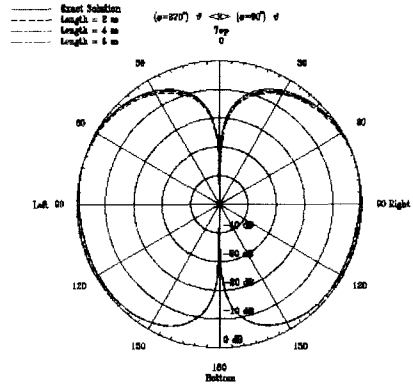
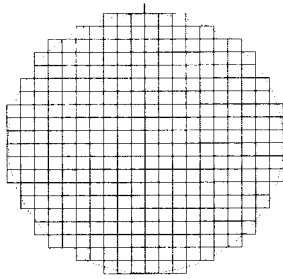


그림 7. 실린더의 길이 L의 변화에 따른 안테나의 방사 특성 해석
Fig. 7. Radiation patterns of a wire antenna to various lengths, L or a cylinder.

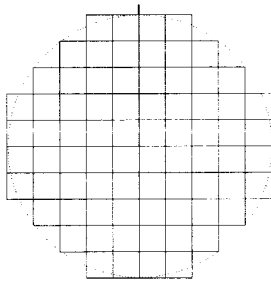
그림 7은 그림 3의 구조에서 실린더의 길이가 L로 유한함에 따라 발생된 계산 오차를 분석한 결과이다. 300 MHz에서 $\lambda/4$ 의 길이를 갖고 25cm의 반경을 갖는 실린더 위에 짧은 모노폴 안테나가 탑재되어 있을 경우, 실린더의 길이를 각각 2m, 4m, 6m로 변화시키기에 따른 $\phi=90^\circ$ 에서의 방사 특성 결과를 Carter의 해석 결과와 비교하여 나타내었다. 실린더의 길이가 증가함에 따라 전체 time step도 역시 각각 350, 500, 650으로 증가하였으며 사용된 PML layer는 6개, reflection factor는 1.0×10^{-6} 이하이며 입력 신호는 마찬가지로 sinusoidal 함수를 인가하였다. 해석 결과, 길이가 점점 증가함에 따라 FDTD법 해석 결과는 무한 길이 해석 결과인 Carter의 해석 결과에 점점 접근함을 확인할 수 있다. 따라서, 그림 6에서 발생된 미소한 오차는 실린더의 길이가 제한됨에 따른 오차임을 확인할 수 있다.

또한 일반적으로 FDTD법에 의한 초고주파 구조물에 대한 해석시 필요한 셀의 크기는 해석시 중심 주파수의 값에 따라 영향을 받게 된다. 이러한 조건은 실린더 구조와 같은 곡률 반경을 가질 때에 셀 크기의 변화는 실제 구조물의 모델링에 따른 계산 오차 또한 발생시킬 수 있기 때문이다. 그림 8의 (a), (b), (c)는 200cm의 길이와 반경 25cm를 갖는 실린더 구조에 각각 2.5cm($\lambda/40$), 5.0cm($\lambda/20$), 6.25cm($\lambda/16$)의 크기로

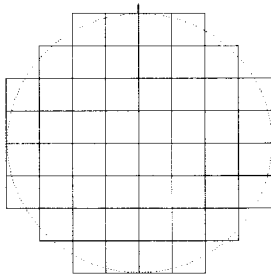
cm($\lambda/40$), 5.0 cm($\lambda/20$), 6.25 cm($\lambda/16$)의 크기로



(a)



(b)



(c)

그림 8. 셀 크기 변화에 따른 실린더의 단면 구조도

- (a) 단일 셀 크기가 $\lambda/40$ 인 경우
- (b) 단일 셀 크기가 $\lambda/20$ 인 경우
- (c) 단일 셀 크기가 $\lambda/16$ 인 경우

Fig. 8. Cross sections geometry of meshes of a cylinder using three different cell sizes.

- (a) One cell size = $\lambda/40$
- (b) One cell size = $\lambda/20$
- (c) One cell size = $\lambda/16$

mesh 분할된 그림이다. 이러한 각각의 구조에 대하여 300 MHz의 중심 주파수에서 FDTD 해석을 수행한 결과, 그림 9와 같은 결과를 볼 수 있다. 셀의 크기가 $\lambda/40$, $\lambda/20$, $\lambda/16$ 로 변함에 따른 안테나의 방사 특성은 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이는 일반적으로 FDTD법 해석에서 계산의 신뢰성을 보장할 수 있는 범

위의 기준인 $\lambda/10$ 이하의 mesh 분할법이 사용된다는 사항을 잘 만족하고 있음을 확인할 수 있다. 또 FDTD 방법의 해석 결과와 Carter의 해석 결과와는 작은 차이를 관찰 할 수 있는데 이는 상기에서도 설명하였던 것과 마찬가지로 계산 시간의 효율성을 높이기 위해 실린더의 길이를 L로 제한함에 따른 오차 발생 결과이다. 그러나, 이러한 오차는 허용할 수 있는 범위내에서 무시할 수 있는 작은 값이다.

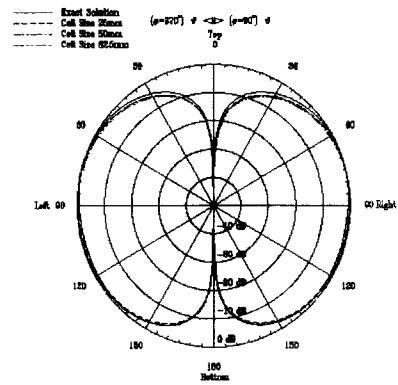


그림 9. 반경 25cm, 길이 200cm의 실린더 구조에 셀 크기 변화에 따른 안테나의 방사 특성

Fig. 9. Radiation patterns of a antenna on a cylinder with radius 25cm and length 200cm to different cell sizes.

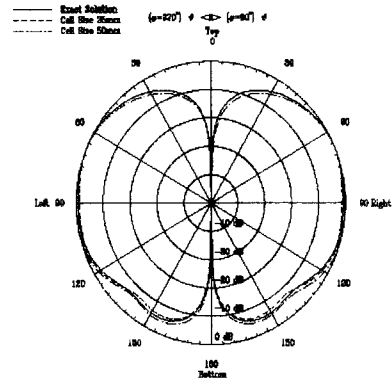


그림 10. 반경 50cm, 길이 400cm의 실린더 구조에 셀 크기 변화에 따른 안테나의 방사 특성

Fig. 10. Radiation patterns of a antenna on a cylinder with radius 50cm and length 400cm to different cell sizes.

반면, 실린더 전체 크기를 2 배로 증가함에 따른 해

식 결과를 그림 10에 나타내었다. 실린더의 길이가 400 cm, 반경은 50 cm로 하였고, 셀의 크기는 각각 2.5 cm, 5.0 cm로 변화하였을 때 해석한 값이다. 해석 결과, 그림 9에서 관찰할 수 있었던 것과 같이 역시 셀의 크기 변화에는 큰 영향이 없이 원거리장으로 방사된 E_{θ} 의 크기 값은 서로 매우 잘 일치하고 있음을 확인 할 수 있다. 하단 부분에서의 방사 패턴의 일그러짐 특성은 실린더의 전체 크기가 모노폴 안테나의 전기적 길이에 비하여 크게 증가됨으로 상대적으로 실린더의 하단 부분으로 방사되는 전력의 양이 감소되어 방사 패턴에서의 일그러짐은 특성이 발생하고 있다.

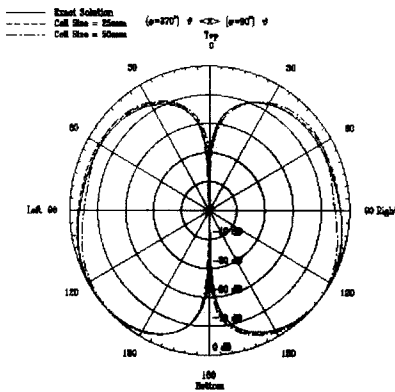


그림 11. 반경 25cm인 도체 구면 위에 안테나가 탑재 되었을 경우 셀 크기 변화에 따른 안테나의 방사 특성

Fig. 11. Radiation patterns of a antenna on a sphere with radius 25cm to different cell sizes.

그림 11은 반경이 25 cm인 도체 구면 위에 짧은 모노폴 안테나가 탑재되어 있는 경우에 대한 FDTD 해석 및 수학적 해석 결과를 비교한 것이다. 분할된 셀의 크기는 각각 2.5 cm, 5.0 cm이고 안테나는 매우 짧은 와이어 안테나이다. 총 time step은 350이며 PML layer의 개수는 5개, reflection factor는 1.0×10^{-6} 이하이다. 해석 결과, 역시 정확한 수학적 해석 결과와 FDTD 법 해석 결과는 서로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 12의 경우 도체 구면의 반경이 50 cm로 두 배 증가하였을 경우, θ 값의 변화에 따른 방사 특성 결과이다. 단일 셀 크기가 2.5 cm에서 5.0 cm로 두 배 증가할 경우 다소 오차 값이 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 그림 11의 경우보다 그림 12의 경우에서 더 두

드러지게 나타나게 되는데 이는 곡률 반경을 갖는 구조를 정육면체 셀로 모델링하는데 생기는 오차 면적이 상대적으로 더 증가함에 따른 결과이다.

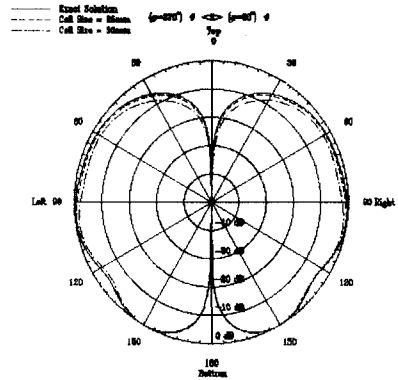


그림 12. 반경 50cm인 도체 구면 위에 안테나가 탑재 되었을 경우 셀 크기 변화에 따른 안테나의 방사 특성

Fig. 12. Radiation patterns of a antenna on a sphere with radius 50cm to different cell sizes.

이상과 같이 다양한 곡면체인 실린더 및 구의 구조에 짧은 안테나가 탑재되어 있는 대상체에 대해 FDTD 해석을 수행하였으며 본 논문에서 제안된 방법의 정확성을 확인하였다. 해석의 관심 영역으로는 곡률 반경을 갖는 구조물에 대하여 직각 셀을 이용한 곡면 구조 모델링 및 와이어 안테나의 급전시 영향을 미치는 주변 접지면의 면적 특성 및 사용 주파수에 따른 셀 크기 변화 특성을 고찰해 보았고, 상기의 해석 결과에서 살펴 볼 수 있었던 3차원 PML 흡수 경계 조건을 이용하는 본 FDTD 해석 결과는 기존의 정확한 수학적 해석 방법의 결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

III. FDTD 기법을 이용한 블랙호크 헬기 구조물에 대한 해석

상기의 다양한 곡률 반경을 갖는 구조물에 대해 그 응용성과 계산의 정확성이 검증된 본 FDTD 해석 코드를 이용하여 헬기와 같은 대형 구조물에 대한 시간 영역에서의 해석을 수행 할 수 있다. 블랙호크 모델과 같이 실제 구조가 도체 영역 뿐 만이 아니라 유리창 부분 및 비행기 관내 좌석 등의 기타 유전체 물질 등을

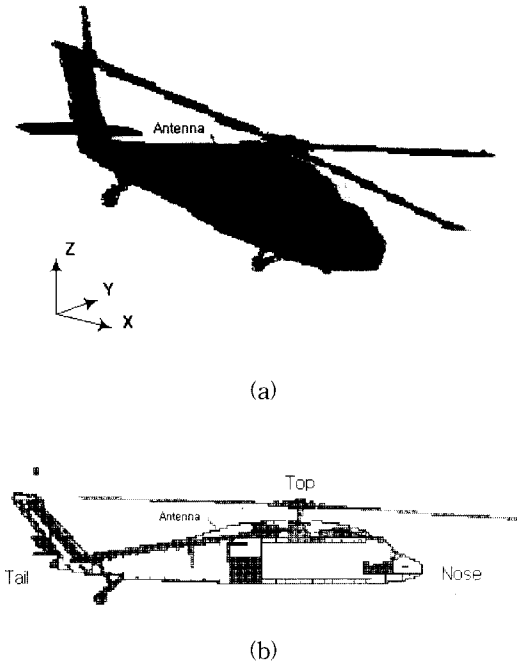


그림 13. (a) FDTD 법 해석을 위해 실제 크기를 고려해 mesh 분할된 블랙호크 헬기 모델과 (b) mesh 분할된 블랙호크 헬기 모델의 $y=295$ 의 지점에서의 단면 구조

Fig. 13. (a) 3D geometry of meshes of the Blackhawk helicopter for FDTD analysis, (b) Cross sectional geometry of meshes of the Blackhawk helicopter at $y=295$.

내포하고 있을 때 실제와 같이 정확히 구조적 모델링 하는 것이 필요하다. 또한 헬기의 경우 두 개의 회전날개가 있는데 특히, 안테나가 부착되어 있는 근처인 주 회전날개의 경우 회전 위치에 따른 안테나의 방사 특성이 큰 영향을 받기 때문에 정확한 모델링이 필요하다. 따라서 이러한 방대하고 복잡한 구조를 모델링 하기 위해서는 전문적인 CAD 툴이 필요하고 본 논문에서는 BRL-CAD를 이용하여 그림 13의 (a)와 같이 3차원으로 블랙호크 헬기를 모델링하였다. 헬기의 실제 크기는 주 회전날개를 포함하여 길이 15m, 높이 2.95m의 실물 구조이며 해석의 중심 주파수는 250 MHz, 셀 크기는 $90\text{ mm} (\approx \lambda/13)$ 로 하였다. 따라서, 전체 셀 개수는 $228 \times 190 \times 70$ 이고 총 time step은 2500, PML layer의 개수는 4개, reflection factor는 1.0×10^{-6} 이하이다. 이러한 구조에 대하여 위치가 $(98\Delta x, 95\Delta y, 35\Delta z)$ 인 지점에 길이가 56cm인 짧은 모노폴 안테나가 경사각 45° 의 기울기로 탑재되어 있을 때 $\Delta y=95$ 인 지

점에서의 헬기의 측단면도는 그림 13의 (b)와 같이 나타낼 수 있다.

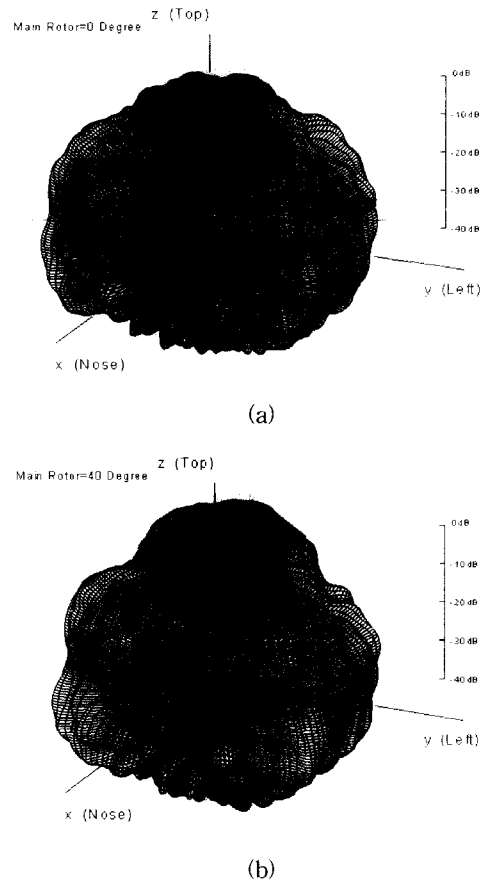


그림 14. 블랙호크 헬기에 모노폴 안테나가 45° 각도의 기울기로 $(\Delta 98, \Delta 95, \Delta 35)$ 위치에 탑재되었고, (a) 주 회전날개가 0° 일때와 (b) 주 회전날개가 40° 일때의 안테나 방사 특성

Fig. 14. Radiation patterns of an antenna with 45° tilt on the Blackhawk helicopter at $(\Delta 98, \Delta 95, \Delta 35)$, (a) Main rotor = 0° , (b) Main rotor = 40° .

그림 14는 그림 13의 구조에 대해 본 논문에서 제안된 FDTD 프로그램을 수행하여 far-field E_θ 의 방사 패턴을 구한 결과이다. 여기서 far-field E_θ 의 값은 상대적으로 너무 작아 무시하였다. 그림 14의 (a)는 짧은 모노폴 안테나가 $(98\Delta x, 95\Delta y, 35\Delta z)$ 의 헬기 상단 부분에 45° 의 기울기로 탑재되어 있을 때, 꼬리 회전날개가 0° 이며 주 회전날개도 0° 의 경우에 대해서, 안테나 방사 특성을 해석한 결과이다. 안테나 방사 특성에 대

한 3차원의 도시 방법은 W. R. Scott가 제안한 3차원 방법을 이용하여 나타내었다^[13]. 그림 14의 (a)에서 관찰할 수 있듯이 사용 주파수가 헬기의 본체 길이의 수 배 정도 이내일 때 본체 자체가 안테나 역할을 함을 볼 수 있다. 그림 14의 (b)는 꼬리 회전날개가 0°로 고정되어 있는 반면 주 회전날개가 40°로 회전했을 때의 안테나 방사 특성 결과이다. 그림 14의 (a) 경우에 비하여 상단부의 방사 특성이 변화하고 있음을 알 수 있다. 주 회전날개가 회전함에 따라 그림 14 (a)의 경우에 비하여 상단부의 방사 특성이 약 5~10 dB 정도가 회전 날개의 회전에 따라 변화함을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 3차원의 PML 흡수 경계 조건을 갖는 FDTD법을 이용하여 다양한 곡면체의 구조물에 적용하여 해석하였다. 논문에 사용된 FDTD법의 타당성을 검증하기 위해 실린더 및 구면 위에 놓인 안테나의 방사 특성에 대한 기존의 정확한 수학적 계산 방법인 Carter 및 Harrington에 의한 결과 값과 비교한 결과, 두 결과가 매우 잘 일치됨을 확인할 수 있었다. 또한 와이어 안테나 등의 해석에 필요한 동축 선로 급전 모델시 안테나의 방사 특성에 가장 민감한 영향을 받을 수 있는 급전영역 근처의 접지면에 대한 영향을 해석하였다. 해석 결과, 안테나의 법선 방향의 방사형으로 인가해야 할 소스 전압을 위해 필요한 동일 평면상의 접지면의 면적에 따른 영향은 중심 주파수의 $\lambda/40$ 정도의 단일 셀 크기 반지름으로 둘러싸이는 최소 면적만 있을 때 추가 접지 면적의 증가에 따른 영향이 거의 없음을 확인하였다.

또한, 이러한 해석 기법을 이용하여 블랙호크 헬기에 탑재된 안테나의 방사 특성을 해석하였다. 안테나가 헬기의 상단 부분에 탑재될 경우 안테나에 인접한 주 회전날개에 의해 안테나의 방사 특성이 회전날개 회전 방향에 따라 약 5~10 dB 정도가 감소되는 영향이 나타남을 확인하였다. 이러한 해석 결과는 실제 복잡한 비행체 구조에서 방사 특성을 극대화할 수 있는 안테나의 최적 탑재 위치를 찾을 수 있을 뿐만 아니라 다중 안테나가 탑재될 경우 각 안테나간의 혼신 해석을 통한 최적 안테나 배치 문제도 쉽게 해결 할 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] P. S. Carter, "Antenna Arrays Around Cylinders," Proceedings of the I.R.E., Dec. 1943, pp. 671-692.
- [2] R. F. Harrington, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, 1961.
- [3] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," IEEE Trans. Antenna and Propagation, vol. 14, 1966, pp. 302-307.
- [4] A. Taflove and K. R. Umashankar, "Review of FD-TD numerical modeling of electromagnetic wave scattering and radar cross section," Proceeding of the IEEE, vol. 77, May 1989, pp. 682-699.
- [5] A. Taflove, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Artech House, 1995.
- [6] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*. CRC Press, 1993.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] R. Mittra and U. Pikel, "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.
- [10] "BRL-CAD User's Manual," vol. IV, Rel. 4.0, The Ballistic Research Laboratory, Dec. 1991.
- [11] G. Laguna, "Anastasia: A solid model based 3D Finite Difference Mesh Generator,"

Lawrence Livermore National Laboratory,
Oct. 1990.

- [12] 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.

- [13] Waymond, R. Scott, "A General Program For Plotting Three-Dimensional Antenna Patterns," IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, Dec. 1989, pp. 6-11.

저 자 소 개



金炳南(正會員)

1996년 2월 아주대학교 전자공학과 졸업(학사). 1998년 2월 아주대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1998년 3월~현재 한국정보통신대학원대학교 공학부(박사과정). 주관심분야는 FDTD 기법을 이용한 초고주

파 구조물 최적 설계 및 모델링, 소형 고효율 안테나 설계, 초고속/고밀도 반도체 소자의 최적 패키징 설계 등임



朴星暻(正會員)

1987년 2월 경북대학교 전자공학과(학사). 1989년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(석사). 1993년 8월 한국통신인력개발본부 1997년 3월 Arizona State University, Electrical Engineering(박사). 1997

년 9월~현재 한국정보통신대학원대학교 조교수 주관심분야는 광대역 적층형 안테나의 설계 및 분석, 전자파의 복사 및 산란, M/W, mm-wave 대역용 고속 반도체 소자의 전자패키징, 전자장 수치 해석기법 등임