

FDTD 방법을 이용한 간단한 건물 구조의 광대역 차폐 효과에 관한 연구

Study on Wideband Shielding Effects of Simple Building Structures Using FDTD Method

조제훈 · 하상규 · 박성민 · 추광욱* · 주세훈* · 김형동 · 정경영

Jeahoon Cho · Sang-Gyu Ha · Sungmin Park · Kwanguk Chu* · Saehoon Ju* · Hyeongdong Kim · Kyung-Young Jung

요 약

본 논문은 유한 차분 시간 영역(FDTD: Finite-Difference Time-Domain)법을 이용하여 간단한 건물 구조의 광대역 복사성 펄스 결합에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 건물을 콘크리트와 유리로 구성하였으며, 각 물질의 전기적 특성을 수치적으로 모델링하였다. 본 논문에서는 본 연구팀에서 개발한 분산 FDTD 알고리즘을 이용하여 건물의 전자파 특성 해석을 수행하고, 건물 구조에 따른 차폐 효과를 50 MHz~1 GHz 대역에서 분석하였다.

Abstract

We perform a wideband radiated pulse coupling analysis of simple building structures using the finite-difference time-domain(FDTD) method. Toward this purpose, the building structures composed of concrete and window materials are assumed and we numerically model the electrical properties of each material. In this work, we apply a dispersive FDTD algorithm for the electromagnetic analysis of building structures and investigate their shielding effectiveness in the frequency range of 50 MHz to 1 GHz.

Key words : Building Structures, FDTD, Dispersion, Concrete, Window

I. 서 론

최근 건물의 복사성 펄스 결합과 관련된 연구에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 외부에서 발생한 전자파는 건물을 투과하여 내부에 위치하고 있는 전기적 시스템의 오작동 및 파괴와 같은 장애의 원인이 될 수 있다^[1]. 이러한 전자파에 대한 영향을 최소화하기 위해서는 일정한 기준의 전자파 내성이 요구되며, 이와 같은 보호 수준을 결정하기 위해 전자파

환경에 대한 분석이 필수적이다. 하지만 건물은 건설을 위해 막대한 비용과 시간이 필요하기 때문에 완공 이후 전자파 환경을 분석하여 건물 구조 및 구성 자재를 변경하는 것은 매우 비효율적인 일이다. 따라서 설계 단계부터 전자파 환경에 대한 분석이 요구되며, 이를 위해 수치 해석 기법을 이용한 전자파 해석법이 많이 이용되고 있다. 다양한 기법 중 유한차분 시간 영역(FDTD: Finite-Difference Time-Domain)법은 한 번의 시뮬레이션으로 광대역 주파수 응

「본 연구는 ETRI 부설연구소 위탁과제의 연구 결과로 수행되었음.」

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과(Department of Electronics Computer Engineering, Hanyang University)

*ETRI 부설연구소(Attached Institute of ETRI)

· Manuscript received April 16, 2013 ; Revised May 23, 2013 ; Accepted June 4, 2013. (ID No. 20130416-048)

· Corresponding Author : Kyung-Young Jung (e-mail : kyjung3@hanyang.ac.kr)

답을 얻을 수 있고, 행렬 계산이 불필요하기 때문에 전기적으로 큰 구조물의 산란 효과를 분석하는데 매우 적합하다^[2]. 한편, 건물은 서로 다른 전기적 특성을 갖는 물질들로 구성되며, FDTD를 이용한 건물의 전자파 해석을 수행하기 위해서는 각 물질들에 대한 전기적 모델링이 필요하다. 특히, 콘크리트와 같이 주파수에 따라 전기적 성질이 변하는 분산 매질은 분산 특성을 수치적으로 모델링할 수 있는 분산 모델이 반드시 요구된다. 하지만 건물의 전자파 해석과 관련된 기존의 연구들은 다양한 구조 및 구성 성분에 대한 해석은 이루어졌으나^{[3]~[5]}, 분산 특성을 고려하지 않았기 때문에 해석의 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 건물을 유리, 콘크리트로 구성된 간단한 구조로 가정하였으며, 분산 FDTD 알고리즘을 이용하여 외부 전자파에 대한 건물의 전자파 차폐 효과를 분석하였다. 이를 위해 각 물질의 전기적 특성은 전기적 모델링 방법을 이용하여 수치적으로 표현하였으며, 이를 FDTD에 적용하였다. 특히, 분산 매질인 콘크리트의 전기적 특성은 2차 분수함수식(QCRF: Quadratic Complex Rational Function) 분산 모델을 이용하여 모델링하였다^[6].

II. 본 론

2.1 유리와 콘크리트의 전기적 모델링

건물의 창문에 주로 사용되고 있는 유리는 투명도가 높은 유전체로 구성 원소 및 온도에 따라 전기적 성질이 변하는 특성을 갖고 있으나, 주파수의 변화에 민감하지 않기 때문에 비분산 매질로 고려할 수 있으며, 본 연구에서는 유리의 비유전율을 6.5로 상수로 가정하였다.

콘크리트는 유리와 달리 주파수에 따라 유전율이 변하는 분산 매질이기 때문에 분산 특성을 수치적으로 표현할 수 있는 분산 모델링 방법이 필요하다. 콘크리트의 분산 특성을 모델링하기 위해서 Extended Debye와 Cole-Cole 모델을 이용한 연구가 이루어졌으나, Extended Debye 모델은 정확도가 떨어지며, Cole-Cole 모델은 분산 모델링 표현식에 미분항이 포함되어 있어서 FDTD에 적용할 경우 매우 많은 메모리와 계산 시간이 요구된다^[7]. 최근 콘크리트의 분산 특성을 정확하게 모델링할 수 있는 QCRF 분산 모델

링 방법이 소개되었으며, 콘크리트의 복소 상대 유전율을 식 (1)로 표현하고 있다^[6].

$$\epsilon_{r,QCRF}(\omega) = \frac{A_0 + A_1(j\omega) + A_2(j\omega)^2}{1 + B_1(j\omega) + B_2(j\omega)^2} \quad (1)$$

여기서 A_0, A_1, A_2, B_1, B_2 는 계수를 의미한다. 참고문헌 [6]에서는 낮은 주파수에서도 콘크리트의 분산 특성을 정확하게 모델링하기 위해서 가중 함수를 적용하였으며, 최적의 가중치(WF: Weighting Factor)를 추출하기 위해서 뉴턴반복법을 이용하였다. 또한 물 배합(WCR: Water Cement Ratio)에 따른 콘크리트의 복소 유전율을 측정된 실험데이터^{[7],[8]}와 비교하여 제안된 분산 모델링 방법의 정확성을 검증하였으며, 이때 사용된 주파수에 따른 샘플 값을 정확하게 추출하기 위하여 Plot Digitizer^[9]를 이용하였다. 본 연구에서는 건물의 전자파 해석을 수행하기 위해 참고문헌 [6]에서 WCR=5.5 조건으로 추출한 분산 모델링 방법의 각 계수와 가중치를 이용하였으며, 이를 표 1에서 정리하였다. 그림 1은 WCR=5.5 조건에서 주파수에 따른 콘크리트의 복소 유전율을 도시한 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 QCRF 분산 모델을 이용하여 계산된 복소 유전율과 실험적으로 측정된 데이터^[8]가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

2.2 분산 FDTD 알고리즘

분산 특성을 적용한 FDTD 업데이트 수식은 식 (2)의 constitutive relation을 이용하여 구할 수 있다.

표 1. QCRF 계수와 최적의 가중치^[6]

Table 1. QCRF coefficients and optimal WF^[6].

WCR=5.5			
A_0	18.846	A_1	$9.48e^{-8}$
A_2	$2.44e^{-17}$	B_1	$1.27e^{-8}$
B_2	$4.28e^{-18}$	W_F	3.1010

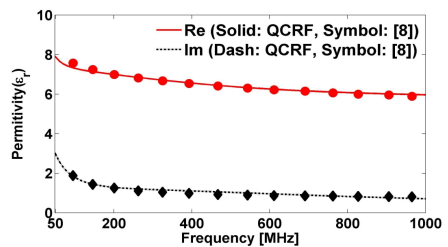


그림 1. 콘크리트(WCR=5.5)의 복소 유전율
Fig. 1. Complex permittivity of concrete(WCR=5.5).

$$\vec{D}(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_r \text{QCRF}(\omega) \vec{E}(\omega) \quad (2)$$

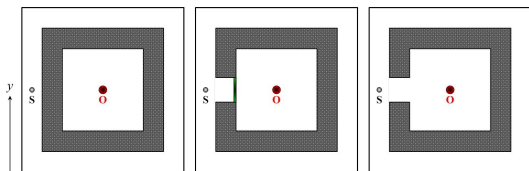
여기서 $\vec{D}(\omega)$ 는 분산 특성을 갖는 전속밀도이며, ϵ_0 는 자유 공간에서의 유전율이다. 식 (2)에 식 (1)을 대입하여 푸리에 역변환과 중심 차분법을 이용하고, 이를 정리하면 식 (3)과 같이 전계에 대한 최종 업데이트 수식을 얻을 수 있다^[7].

$$\vec{E}^{n+1} = C_a \vec{E}^n + C_b \vec{E}^{n-1} + C_c \vec{D}^{n+1} + C_d \vec{D}^n + C_e \vec{D}^{n-1} \quad (3)$$

여기서 $C_a = -2(\alpha_0 - \alpha_2)/(\alpha_1 + \alpha_2)$, $C_b = (\alpha_1 - \alpha_2)/(\alpha_1 + \alpha_2)$, $C_c = (\beta_1 + \beta_2)/(\alpha_1 + \alpha_2)$, $C_d = 2(\beta_0 - \beta_2)/(\alpha_1 + \alpha_2)$, $C_e = -(\beta_1 - \beta_2)/(\alpha_1 + \alpha_2)$ 이며, $\alpha_0 = A_0 \Delta t^2$, $\alpha_1 = A_1 \Delta t$, $\alpha_2 = 2A_2$, $\beta_0 = \Delta t^2/\epsilon_0$, $\beta_1 = B_1 \Delta t/\epsilon_0$, $\beta_2 = 2B_2/\epsilon_0$ 이다. 한편, 자계 업데이트 수식은 콘크리트의 경우 자성체가 아니므로 기존의 FDTD 자계 업데이트 수식이 동일하게 사용된다. 우리는 비유전율을 6.5로 상수로 가정하였으므로, 식 (3)의 계수들은 $C_a = C_b = C_d = C_e = 0$, $C_c = 1/(6.5\epsilon_0)$ 이 된다.

2.3 2차원 건물의 전자파 특성 해석

그림 2와 같이 xy 평면에 건물의 단면(2차원 TE 구조)이 위치하고 있으며, 4 m×4 m의 크기로 이루어져 있다. 그림 2(a)는 두께 0.5 m의 콘크리트로 꽉 막힌 구조, 그림 2(b)는 0.5 m×0.6 m의 개구면을 콘크리트 한쪽 벽에 설치하여 0.05 m×0.6 m의 유리를 포함한 구조, 그림 2(c)는 유리가 없는 구조를 나타내고 있다. 시뮬레이션 수행을 위한 공간 간격은 $\Delta x = \Delta y = 5$ mm, 시간 간격 $\Delta t = 0.117$ ps로 설정하였다. 외부 전자파는 미분형 가우시안 펄스를 포인트 소스로 여기시켰으며, 여기파의 위치는 $S(0.25$ m, 2 m), 관측점의 위치는 $O(2.05$ m, 2.05 m)이다. 본 연구에



(a) 꽉 막힌 구조 (b) 유리가 있는 구조 (c) 유리가 없는 구조
(a) Closed wall (b) w/ window (c) w/o window

그림 2. 간단한 2차원 건물 구조
Fig. 2. Simple 2-D building structure.

서는 그림 2와 같은 간단한 건물 구조에 대한 전자파 해석을 수행하였으며, 계산된 결과를 이용하여 관측점에 대한 전자파 차폐 효과를 분석하였다.

$$SE_{dB}(\omega) = 20 \log_{10} \frac{|\vec{E}_{non}(\omega)|}{|\vec{E}_{with}(\omega)|} \quad (4)$$

식 (4)에서 $\vec{E}_{with}(\omega)$ 는 건물이 존재할 때 관측점에서 계산된 주파수 영역의 전계, $\vec{E}_{non}(\omega)$ 은 건물이 존재하지 않을 때의 전계이며, 주파수 응답 결과는 푸리에 변환을 이용하여 구하였다.

QCRF 기반의 분산 FDTD의 정확성을 확인하기 위해서 비분산 Yee FDTD^[2]의 단일 주파수 해석 결과와 비교하였다. 비분산 Yee FDTD의 경우, 상수인 복소 유전율을 사용하여야 하므로 실험데이터^[8]에서 4개의 주파수(95.4, 393, 691, 965 MHz)에 대한 값을 각각 추출하여 반복적으로 수행하였다. 또한, 분산 FDTD의 필요성을 확인하기 위하여 비분산 Yee FDTD의 광대역 주파수 해석 결과를 동시에 도시하였으며, 이때 사용된 복소 유전율은 관심 주파수 대역의 중간 근처인 534 MHz의 값을 추출하여 사용하였다.

그림 3은 그림 2(a) 구조에 대한 전자파 차폐 효과를 관심 주파수 50 MHz~1 GHz 대역에서 도시한 것이다. 실선, 점선, 심볼은 각각 QCRF 분산 FDTD 알고리즘, 광대역 비분산 Yee FDTD 알고리즘, 단일 주파수 비분산 Yee FDTD 알고리즘의 해석 결과이다. QCRF 분산 FDTD의 해석 결과는 비분산 Yee FDTD의 단일 주파수 해석 결과와 잘 일치하고 있으나, 광대역 비분산 Yee FDTD는 QCRF 분산 FDTD와 비교하여 최대 약 8.3 dB의 차이가 발생하고 있다. 이는 정확한 전자파 특성 해석을 수행하기 위해선 분산 특성을 고려해야함을 의미한다.

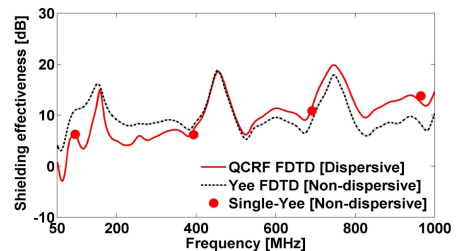


그림 3. 콘크리트 모델에 대한 차폐 효과
Fig. 3. Shielding effectiveness of concrete models.

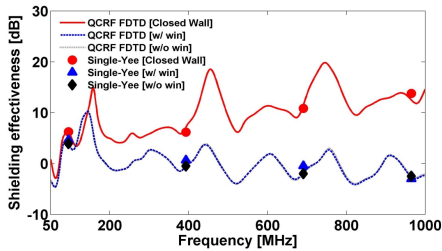


그림 4. 건물 구조에 대한 차폐 효과
Fig. 4. Shielding effectiveness of building structures.

그림 4는 분산 FDTD 알고리즘을 이용하여 각 건물 구조에 대한 전자파 차폐 효과를 도시한 것이다. 그림 2의 건물 구조를 통해서 예상할 수 있듯이 콘크리트로 꼭 막힌 구조의 차폐 효과가 가장 우수함을 확인할 수 있다. 또한, 그림 2(b), (c) 구조에 대한 차폐 효과는 거의 차이가 없으며, 이는 전자파 해석을 위한 건물 구조 및 구성 자재 모델링에서 우리는 고려하지 않아도 복사성 펄스 결합 특성에는 큰 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다. 한편, 각 건물 구조의 차폐 효과 결과에서 주파수에 따라 리플현상을 확인할 수 있는데, 이는 차폐 효과가 건물 구조 내의 다양한 모드의 공진 특성에 영향을 받고 있음을 보여준다. 최근에 포함된 강화콘크리트 구조인 경우에는 모드 분석에 따른 공진 주파수 예측이 가능하나^[10], 본 연구에서 고려된 콘크리트 구조는 공진 주파수 예측이 불가능하기 때문에 본 연구에서와 같이 수치 해석을 이용한 분석이 필요하다. 아울러, 해석 결과에서 0 dB 이하의 차폐 효과는 관측점의 위치가 건물 중심에 위치하여 콘크리트 벽에서 발생하는 공진 특성이 반영되었기 때문이며, 관측점의 위치를 건물 외부로 설정한 경우에는 계산된 차폐 효과는 모두 양의 값이 계산됨을 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 분산 FDTD 알고리즘을 이용하여 건물에 대한 전자파 해석을 수행하고, 간단한 건물 구조에 대한 차폐 효과를 분석하였다. 이를 위해 전기적 모델링 방법을 이용하여 건물의 구성 물질을 수치적으로 표현하였으며, 이를 FDTD 기법에 적용하였다. 본 논문에서 사용된 분산 알고리즘을 강화 콘크리트, 다층 건물 구조, 다수의 방이 존재하는 3차원 건물 구조에 적용하면 실제 환경에 대한 복사

성 펄스 결합 해석이 가능하다고 사료된다.

References

- [1] W. A. Radasky, C. E. Baum, and M. W. Wik, "Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI)", *IEEE Trans. Electromagn. Comput.*, vol. 46, no. 3, pp. 314-321, Aug. 2004.
- [2] A. Taflove, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd Ed., Artech House, 2005.
- [3] 강희도, 오일영, 김정호, 육종관, "다층 지하 구조 물로의 고고도 전자기파(HEMP) 커플링 현상에 대한 전자기적 모델링", *한국전자과학회논문지*, 23(3), pp. 392-401, 2012년 3월.
- [4] K. Belli, C. M. Rappaport, H. Zhan, and S. Wadia-Fascetti, "Effectiveness of 2-D and 2.5-D FDTD ground-penetrating radar modeling for bridge-deck deterioration evaluated by 3-D FDTD", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 11, pp. 3656-3663, Nov. 2009.
- [5] A. C. M. Austin, M. J. Neve, and G. B. Rowe, "Modeling propagation in multifloor buildings using the FDTD method", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 11, pp. 4239-4246, Nov. 2011.
- [6] H. Chung, J. Cho, S.-G. Ha, S. Ju, and K.-Y. Jung, "Accurate FDTD dispersive modeling for concrete materials", *ETRI J.*, Accepted.
- [7] A. Robert, "Dielectric permittivity of concrete between 50 MHz and 1 GHz and GPR measurements for building materials evaluation", *J. Appl. Geophys.*, vol. 40, no. 1-3, pp. 89-94, Oct. 1998.
- [8] M. N. Soutsos, J. H. Bungey, S. G. Millard, M. R. Shaw, and A. Patterson, "Dielectric properties of concrete and their influence on radar testing", *NDT&E Int.*, vol. 34, no. 6, pp. 419-425, Sep. 2001.
- [9] Plot Digitizer, Univ. of South Alabama, [Online] Available: <http://www.usouthal.edu/physics/software/plotdigitizer.htm>.
- [10] A. Pruksanubal, "Study on electromagnetic properties of reinforced concrete construction wall", *PIER Symposium Proceedings*, pp. 201-204, Mar. 2011.