

제트 엔진 산란 해석을 위한 하이브리드 IPO-MoM 기법

A Hybrid IPO-MoM Technique for Wave Scattering Analysis of Jet Engine

임 호 · 최 승 호* · 명 로 훈

Ho Lim · Seung-Ho Choi* · Noh-Hoon Myung

요 약

전기적으로 크면서 동시에 복잡한 구조인 제트 엔진의 산란 해석을 위해 하이브리드 IPO-MoM(Iterative Physical Optics-Method of Moments) 기법을 제시하였다. 이 기법에서 IPO 기법은 전기적으로 부드럽게 변하는 inlet 영역을, MoM 기법은 회전축과 회전날개를 포함한 전기적으로 복잡하게 변하는 영역을 해석하였다. 각 기법의 장점을 융합하여 상대적으로 효율적이고 정확한 해석이 가능하였다. 수치 결과를 제시하고 기존 Mode-FDTD, 측정 결과와 비교하여 제시한 기법을 검증하였다.

Abstract

A hybrid iterative physical optics-method of moments(IPO-MoM) technique is presented for the analysis of jet engine structures which are both electrically large and complex. In this technique, the IPO method is used to analyze smooth inlet region and the MoM method is used to analyze electrically complex region inclusive of blades and hub. It is efficient and accurate by virtue of combining the respective merits of both methods. Numerical results are presented and validated through comparison with Mode-FDTD and measured results.

Key words : Scattering Analysis, Hybrid Methods, Iterative Physical Optics(IPO), Method of Moments(MoM), Jet Engine

I. 서 론

전자파 해석 분야에서 전투기의 산란 해석은 가장 어렵고 도전적인 과제 중의 하나이다. 전투기 산란 해석의 응용분야는 비협조 표적 인식(non-cooperative target identification), 레이다 단면적 감소 기술, 스텔스 기술, 표적의 탐지/추적을 위한 표적 가시성의 판단 등이 있다. 제트 엔진에 의한 전자파 산란이 전투기의 레이다 단면적에 가장 중요한 부분을 차지하는 요소임이 밝혀졌고, 지난 수년동안 제트 엔진 산란 해석을 하기 위한 많은 연구가 이루어졌다. 초기에

는 매우 간단한 기본 구조에 대해 모드 해석법과 같은 해석적인 방법에 의한 연구가 이루어졌고, 최근에는 컴퓨터 사양의 고급화에 의해서 고주파 기법, 하이브리드 기법과 같은 다양한 수치 해석 방법을 통한 연구가 이루어지고 있다. 모드 해석법은 매우 간단한 기본적인 구조에 대해서만 정확한 결과를 얻을 수 있고, Geometrical Optics(GO), Uniform Theory of Diffraction(UTD), Physical Optics(PO), Physical Theory of Diffraction(PTD) 등과 같은 고주파 기법은 전기적으로 크며, 부드럽게 변하는 구조에 대해서 적용이 가능하다. 이외에도 Finite Element Method(FEM), Me-

「이 연구는 KAIST의 RDRC 연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 연구되었음.」

한국과학기술원 전기 및 전자공학과(Department of Electrical Engineering, KAIST)

*국방과학연구소(Agency for Defense and Development)

· 논문 번호 : 20090529-16S

· 수정완료일자 : 2009년 8월 6일

thod of Moments(MoM), Finite Difference Time Domain (FDTD)와 같은 저주파 기법이 있는데, 이러한 기법은 전기적으로 작은 구조에 대해서만 적용이 가능하다. 위와 같은 단일 기법의 제한성 때문에 최근에는 SBR-MoM^[1], GRE-FDTD^[2], IPO-FDTD^{[2],[3]}, Mode-FDTD^[2] 기법과 같이 고주파 기법과 저주파 기법의 장점을 취하여 만든 하이브리드 기법을 이용해 전기적으로 크며 동시에 복잡한 제트 엔진 구조의 전자파 산란을 해석하고 있다.

본 논문에서는 먼저 IPO 기법을 이용해 고주파 영역 해석을 하여, 고주파 영역과 저주파 영역의 가상 경계면 위에서의 투과 필드를 구하고, 또한 저주파 영역 위에서의 입사 필드를 구한다. 구한 입사 필드는 MoM 기법의 소스로 이용되고, MoM 기법을 이용해 저주파 영역 해석을 하여 가상 경계면 위에서의 산란 필드를 구한다. 최종적으로 일반화된 가역정리를 이용해 구한 투과 필드, 산란 필드로부터 모노스태틱 레이다 단면적을 계산한다.

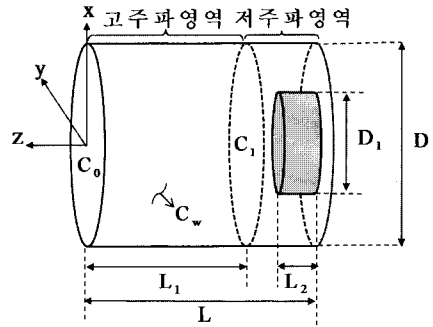
II. 하이브리드 IPO-MoM 기법

2-1 해석 구조

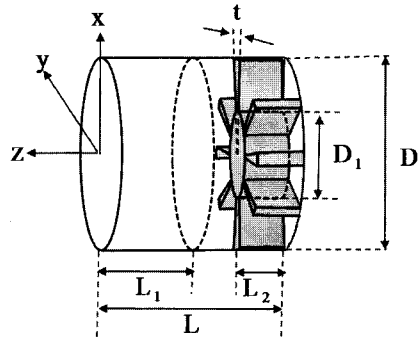
그림 1과 같이 제트 엔진 구조의 inlet 부분을 고주파 영역으로, 허브와 날개를 포함하는 부분을 저주파 영역으로 분해하여 해석하였다. 바깥쪽 평면 C_0 는 입사파가 들어오는 개구면을 나타내고, 안쪽 평면 C_1 은 고주파 영역과 저주파 영역의 가상 경계면을 나타낸다. 전자파 산란 해석에서 제트 엔진의 내부 표면에 의한 산란만을 고려하였다. 전체적인 IPO-MoM 해석 순서를 그림 2에 나타내었고, 세부 내용은 다음 장에 설명하였다.

2-2 IPO 기법

IPO 기법을 이용해 파장당 4개의 사각형 패치로 모델링된 고주파 영역을 해석하여 C_1 에서의 투과 필드를 구한다. 먼저 식 (1)과 같은 PO 근사를 이용해 입사파가 직접 비추지는 모든 안쪽면 패치의 중심점에서의 초기 전류를 구한다. 안쪽면에서의 전류는 식 (2)와 같이 반복적으로 계산되며^[4], 광선 추적이나 전류 변화율을 이용해 안정화될 때까지 계산한다^[3].



(a) 모델 A($L=10 \lambda$, $L_1=8 \lambda$, $L_2=1 \lambda$, $D=8 \lambda$, $D_1=4 \lambda$)



(b) 모델 B($L=6 \lambda$, $L_1=3 \lambda$, $L_2=2 \lambda$, $D=6 \lambda$, $D_1=3 \lambda$, $t=5^\circ$)

그림 1. 제트 엔진 모델

Fig. 1. Jet engine models.

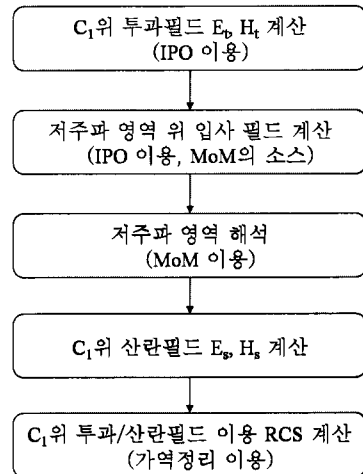


그림 2. IPO-MoM 해석 순서

Fig. 2. IPO-MoM analysis procedure.

먼저 광선 추적을 이용하는 방법은 입사 필드를 여러 개의 광선 튜브로 나누고 각 튜브의 경로를 추적하여 C_1 면에 도달할 때까지 반사한 횟수를 계산한 후, 전체 광선 튜브의 반사 횟수 중 비율이 가장 높은 횟수

를 반복 횟수로 결정하는 방법이다. 다음으로 전류 변화율을 이용하는 방법은 모든 패치의 전류 에너지에 비례하는 양을 식 (3)과 같이 정의하고, 전류 변화율을 식 (4)와 같이 정의하여 전류 변화율이 특정한계치 이하(보통 3~5 %면 적당함)의 값을 가질 때를 반복 횟수로 결정하는 방법이다. 위의 두 방법을 이용해 패치에서의 안정화된 전류를 구하고 나면 식 (5), (6)를 이용해 C_1 에서의 모든 패치의 중심점에서의 투과 필드를 계산한다.

$$\vec{J}_0 = 2\hat{n}_w \times \vec{H}^i \quad (1)$$

$$\vec{J}_n(\vec{r}_c) = \vec{J}_0 + 2\hat{n}_w \times \left[\iint_{C_w} \vec{J}_n(\vec{r}') \times \nabla G_0(\vec{r}_c - \vec{r}') d\vec{s} \right],$$

$$\text{where } \nabla G_0(\vec{r}_c - \vec{r}') = \hat{R} (jk_0 R + 1) \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R^2},$$

$$R = |\vec{r}_c - \vec{r}'|, \hat{R} = \frac{(\vec{r}_c - \vec{r}')}{|\vec{r}_c - \vec{r}'|}, n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\text{Energy}(J_n) \equiv \sum_{\text{all patches}} \sqrt{|J_{nx}|^2 + |J_{ny}|^2 + |J_{nz}|^2} \quad (3)$$

$$\text{Change Rate}(n) \equiv \left| \frac{\text{Energy}(J_n) - \text{Energy}(J_{n-1})}{\text{Energy}(J_{n-1})} \right| \times 100(\%) \quad (4)$$

$$\vec{H}(\vec{r}_c) = \iint_{C_w} \vec{J}_N(\vec{r}_c) \times \nabla G_0(\vec{r}_c - \vec{r}_c) d\vec{s} + \vec{H}^i(\vec{r}_c) \quad (5)$$

$$\vec{E}(\vec{r}_c) = \frac{\eta}{jk_0} \nabla \times \iint_{C_w} \vec{J}_N(\vec{r}_c) \times \nabla G_0(\vec{r}_c - \vec{r}_c) d\vec{s} + \vec{E}^i(\vec{r}_c) \quad (6)$$

이 때, \hat{n}_w 는 안쪽 벽면 C_w 의 단위 법선 벡터, \vec{r}_c 와 \vec{r}_{c_1} 는 각각 C_w 와 C_1 위 패치의 중심점 위치 벡터, $\nabla G_0(\vec{r}_c - \vec{r}_{c_1})$ 는 그린함수의 gradient를 나타낸다.

2-3 MoM 기법

MoM 기법을 이용해 파장당 3~6개의 삼각형 패치로 모델링된 저주파 영역을 해석하여 C_1 에서의 산란 필드를 구한다. RWG(Rao-Wilton-Glisson) 기저함수^[5]에 기반하였으므로 먼저 임피던스 행렬을 구현하기 위해 필요한 기하학적 데이터(에지 노드 넘버, 에지 길이, 삼각형 넓이, 삼각형 중심, 위치 벡터 등)

를 포함하는 RWG 에지 요소들을 구해야 한다. 그리고 나서 식 (7)를 이용해 전장적분방정식의 임피던스 행렬을 구할 수 있다^[6].

$$Z_{mn} = l_m \left[j\omega \left(\frac{\vec{A}_m^+ \cdot \vec{\rho}_m^{c+}}{2} + \frac{\vec{A}_m^- \cdot \vec{\rho}_m^{c-}}{2} \right) + \Phi_{mn}^- - \Phi_{mn}^+ \right],$$

where $m, n = 1, 2, \dots, M$,

$$\vec{A}_m^+ = \frac{\mu}{4\pi} \left[\frac{l_n}{2A_n} \int_{C_n} \vec{\rho}_n^+(\vec{r}') g_m^+(\vec{r}) d\vec{s}' + \frac{l_n}{2A_n} \int_{C_n} \vec{\rho}_n^-(\vec{r}') g_m^+(\vec{r}) d\vec{s}' \right],$$

$$\Phi_{mn}^+ = -\frac{1}{4\pi j\omega \epsilon} \left[\frac{l_n}{A_n} \int_{C_n} g_m^+(\vec{r}) d\vec{s}' - \frac{l_n}{A_n} \int_{C_n} g_m^+(\vec{r}) d\vec{s}' \right],$$

$$\vec{\rho}_m^+ = \vec{r}_m^{c+} - \vec{u}_m^+, \vec{r}_m^- = -\vec{r}_m^{c-} + \vec{u}_m^-, g_m^+(\vec{r}) = \frac{e^{-jk_0 |\vec{r}_m^+ - \vec{r}|}}{|\vec{r}_m^+ - \vec{r}|} \quad (7)$$

이 때, m 과 n 은 각각 m 번째, n 번째 에지 요소를 나타내고, l_m 은 m 요소의 길이, $\vec{\rho}_m^+$ 은 m 번째 에지 요소의 두 삼각형 T_m^+ 의 중심점 \vec{r}_m^{c+} 과 마주 보는 꼭꼭지점 \vec{u}_m^+ 를 잇는 벡터를 나타낸다.

2.4 IPO 기법과 MoM 기법 연결

하이브리드 기법에서 가장 중요한 포인트는 각 기법을 서로 어떻게 연결시키느냐 하는 점이다. 제트 엔진에 투과된 입사파는 고주파 영역을 지나서 C_1 을 거친 후 저주파 영역으로 진행하고 다시 반사해 나와서 C_1 에 도달하게 된다. 이러한 물리적인 특성을 반영하여 IPO-MoM 기법에서는 고주파 영역의 안정화된 전류로부터 저주파 영역 위의 필드를 한번 계산하여 저주파 영역 해석시의 소스로 이용함으로써 두 기법을 연결하였다. 즉, 먼저 저주파 영역 삼각형 패치의 중심점 위치 정보를 추출한 후, IPO 기법을 이용해 고주파 영역을 해석하고, 추출한 위치 위에서의 필드를 계산한다. 이 필드가 바로 MoM의 소스가 되고, 다이폴 모델^[7]을 이용해 식 (8), (9)로부터 C_1 에서의 산란 필드를 계산할 수 있다^[6].

$$\vec{H}(\vec{r}_{c_1}) = \sum_{m=1}^M \vec{H}_m \left(\vec{r}_{c_1} - \frac{1}{2}(\vec{r}_m^{c+} + \vec{r}_m^{c-}) \right) \quad (8)$$

$$\vec{E}(\vec{r}_{c_1}) = \sum_{m=1}^M \vec{E}_m \left(\vec{r}_{c_1} - \frac{1}{2}(\vec{r}_m^{c+} + \vec{r}_m^{c-}) \right),$$

$$\text{where } \vec{H}(\vec{r}) = \frac{jk}{4\pi} (\vec{m} \times \vec{r}) C e^{-jkr}, \quad C = \frac{1}{r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right],$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\eta}{4\pi} \left((\vec{M} - \vec{m}) \left[\frac{jk}{r} + C \right] + 2\vec{M}C \right) e^{-jkr},$$

$$\vec{m} = \int_{\Gamma_m^+ + \Gamma_m^-} I_m \vec{f}_m(\vec{r}) dS = I_m I_m (\vec{r}_m^{c-} - \vec{r}_m^{c+}), \quad \vec{M} = \frac{(\vec{r} \cdot \vec{m}) \vec{r}}{r^2} \quad (9)$$

이 때, \vec{m} 는 다이폴 모멘트를, $\vec{f}_m(\vec{r})$ 는 RWG 기저함수를, I_m 는 m 번째 요소에 해당하는 표면 전류 상수를 나타낸다.

2-5 일반화된 가역정리를 이용한 레이다 단면적 계산

제트 엔진 구조의 경우, 일반화된 가역정리를 이용하면 모노스태틱 레이다 단면적을 구할 수 있다 [2],[8],[9]. 가역정리를 이용하면, C_1 위에서의 필드로부터 C_0 위에서의 필드를 다시 계산할 필요 없이 제트 엔진 외부에서의 산란 필드를 구할 수 있는 장점이 있다. 즉, 그림 1 구조에 가역정리를 이용해 식을 정리하면 식 (10)과 같이 외부에서의 산란 필드를 C_1 에서의 투과 필드, 산란 필드로 나타낼 수 있게 된다.

$$\vec{P}_t \cdot \vec{E}_s = \iint_{C_1} (\vec{E}_s \times \vec{H}_t - \vec{E}_t \times \vec{H}_s) \cdot d\vec{S}, \quad (10)$$

이 때, \vec{P}_t 는 테스트 전류 소스 벡터, (\vec{E}_t, \vec{H}_t) 는 IPO 기법에 의해 계산된 C_1 에서의 투과 필드, (\vec{E}_s, \vec{H}_s) 는 MoM 기법에 의해 계산된 C_1 에서의 산란 필드를 나타낸다.

III. 수치해석 결과

그림 1과 같은 제트 엔진 모델에 대하여 제안한 하이브리드 IPO-MoM 기법을 적용하여 시뮬레이션 하고 다른 결과와 비교하여 검증을 하였다 [2],[10]. 첫 번째 A 모델은 디스크형 허브를 가진 끝이 열린 원통형 캐비티이다. IPO-MoM 기법을 이용해 해석한 결과 그림 3과 같이 Mode-FDTD 결과와 전체적으로 잘 일치하는 결과를 얻었다. 두 번째 B 모델은 디스크형 허브와 8개의 얇은 부채꼴 모양의 날개를 가진 끝이 열린 원통형 캐비티이다. 이 경우 Anastassiou에 의해 측정된 결과와 비교하였고, 비교 결과

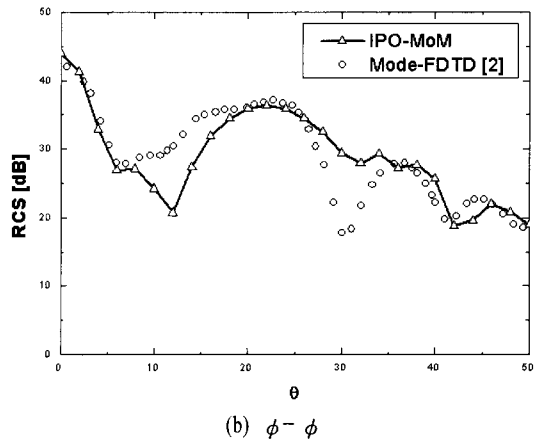
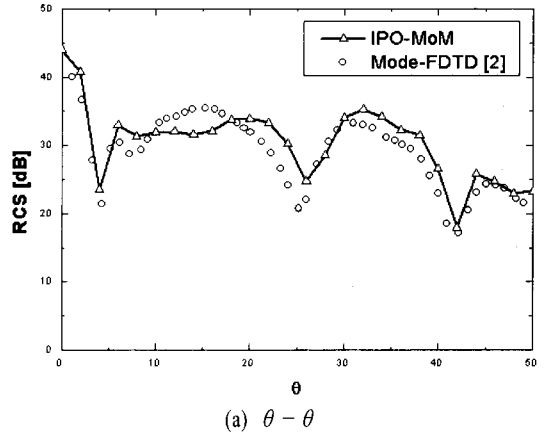
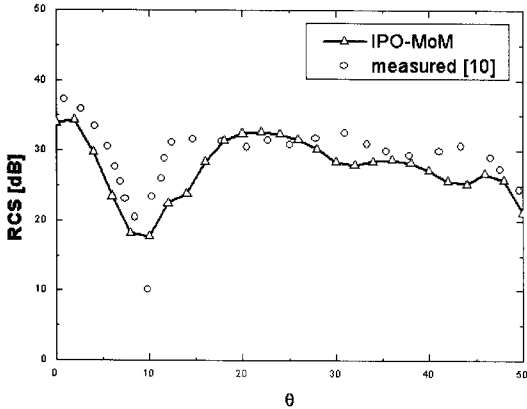


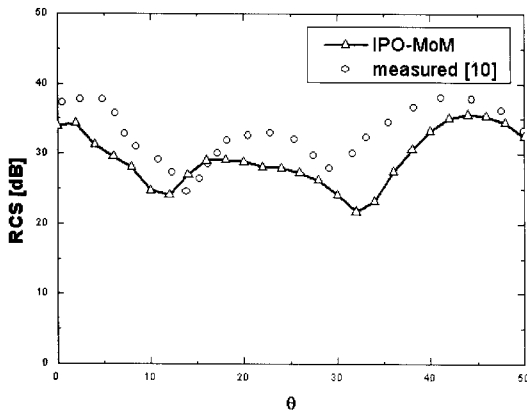
그림 3. 모델 A의 모노스태틱 RCS 결과
Fig. 3. Monostatic RCS result of model A.

그림 4와 같이 전체적으로 잘 일치하는 결과를 얻었다. 두 경우에 나타나는 약간의 오차는 계산시 캐비티 입구의 림 회절 현상을 고려하지 못한 점, 측정시 제트 엔진 외부에 의한 산란도 포함된 점(제트 엔진 바깥면 뒷 부분에 의해 생긴 회절과 등), 패치 모델링 오차, 수치 근사에 의한 오차 등에 의한 것으로 사료된다.

일반적으로 IPO-MoM 기법은 정확도 측면에서 고주파 단일 기법보다 우위에 있고, 저주파 단일 기법보다 하위에 있다. 하지만 제트 엔진처럼 전기적인 길이가 크면서 또한 복잡한 구조의 산란체의 경우 단일 기법으로는 해석에 한계가 있기 때문에 하이브리드 기법으로 해석해야만 한다. 저주파 기법인 MoM과 FDTD의 정확도는 우수하다고 알려져 있고, 제트 엔진에 적용한 하이브리드 방식도 고주파 영역



(a) $\theta - \theta$



(b) $\phi - \phi$

그림 4. 모델 B의 모노스테틱 RCS 결과
Fig. 4. Monostatic RCS result of model B.

에서 저주파 영역으로 한 번 연결해 주는 연결 방식을 취하고 있기 때문에 제트 엔진에 쓰이는 하이브리드 기법의 정확도는 고주파 기법의 정확도에 좌우된다고 할 수 있다. 따라서 IPO-MoM 기법의 정확도는 SBR-MoM 기법의 정확도보다 우수하고, IPO-FDTD의 정확도와는 유사하다고 할 수 있다. 그러나 IPO-FDTD의 경우 입사각이 변하거나 엔진 날개가 회전하는 경우 저주파 영역을 매번 처음부터 다시 계산해야 하므로 계산량이 많아지는 단점이 있는데 반해 IPO-MoM 기법은 저주파 영역의 임피던스 행렬을 한번 계산해 놓고 다시 사용 가능하기 때문에 상대적으로 계산량을 줄일 수 있는 장점이 있다. 따라서 IPO-MoM 기법은 IPO-FDTD 기법에 비해 엔진 날개가 회전하는 경우에 생기는 Jet Engine Modulation (JEM) 현상을 해석하기에 우수하다. 다만, 일반적인

전투기 제트 엔진의 경우 입구 지름이 30λ , 길이가 60λ 정도이므로 IPO-MoM 기법도 기존 하이브리드 기법과 마찬가지로 실제 전투기의 제트 엔진을 해석하기에는 메모리 측면에서 어려움이 있을 수 있는데, 이는 메모리 절감 알고리즘이나 컴퓨터 사양의 고급화로 개선의 여지가 있다.

IV. 결 론

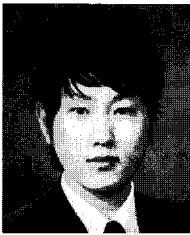
하이브리드 IPO-MoM 기법을 제트 엔진 산란 해석에 처음으로 적용하였다. IPO 기법과 MoM 기법의 연결을 제트 엔진이라는 특수한 상황에서 간결하게 하였고, 수치 해석 결과 제안한 알고리즘의 신뢰성을 검증하였다. 제안한 기법은 IPO 기법과 MoM 기법의 장점을 하이브리드화 하여, 간단하지 않은 inlet 구조와 보다 복잡한 허브와 날개를 가지는 제트 엔진 해석에 유용하게 사용될 것으로 전망한다.

참 고 문 헌

- [1] J. M. Jin et al., "A hybrid SBR/MoM technique for analysis of scattering from small protrusions on a large conducting body", *IEEE Trans. AP*, vol. 46, no. 9, pp. 1349-1357, Sep. 1998.
- [2] T. T. Chia et al., "The application of FDTD in hybrid methods for cavity scattering analysis", *IEEE Trans. AP*, vol. 43, no. 10, pp. 1082-1090, Oct. 1995.
- [3] S. H. Choi et al., "Scattering analysis of open-ended cavity with inner object", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 21, no. 12, pp. 1689-1702, Oct. 2007.
- [4] F. Obelleiro et al., "An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities", *IEEE Trans. AP*, vol. 43, pp. 356-361, Apr. 1995.
- [5] S. M. Rao et al., "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape", *IEEE Trans. AP*, vol. 30, pp. 409-418, May 1982.
- [6] S. N. Makarov, *Antenna and EM Modeling with Matlab®*. New York: Wiley-Interscience, 2002.
- [7] C. J. Leat et al., "Triangular-patch modeling of bow-

- tie antennas: Validation against brown and woodward", *IEE Proc. Microw. AP*, vol. 145, no. 6, pp. 465-470, 1998.
- [8] P. H. Pathak, R. J. Burkholder, "A reciprocity formulation for the EM scattering by an obstacle within a large open cavity", *IEEE Trans. MTT*, vol. 41, no. 4, pp. 702-707, Apr. 1993.
- [9] P. R. Rousseau, R. J. Burkholder, "A hybrid approach for calculating the scattering from obstacles within large, open cavities", *IEEE Trans. MTT*, vol. 43, no. 10, pp. 1068-1075, Oct. 1995.
- [10] H. T. Anastassiou et al, "Electromagnetic scattering from simple jet engine models", *IEEE Trans. AP*, vol. 44, no. 3, pp. 420-421, Mar. 1996.

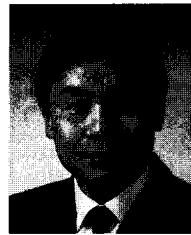
임 호



이용 필터 설계 등

2006년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
 2006년 3월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석박통합과정
 [주 관심분야] 제트 엔진 산란 해석, JEM, 레이다 신호처리, 메타물질

명 로 훈



전기 및 전자공학과 교수

1976년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 12월: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학석사)
 1986년 8월: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학박사)
 1986년 9월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수
 2006년 1월~2006년 12월: 한국전자과학회 학회장
 2004년 3월~현재: 전파탐지 특화연구센터 소장
 2008년 1월~현재: 인공위성 연구센터 소장
 [주 관심분야] 전파 예측 모델, 마이크로웨이브 공학, 안테나 및 레이다 공학, 이동 및 위성 통신, EMI/EMC/EMS 등

최 승 호



연구원

[주 관심분야] 제트 엔진 산란 해석, 전자전 등

1996년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 2월: 포항대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2004년 3월~2008년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)
 1998년 3월~현재: 국방과학연구소