

다중반사 구조를 갖는 복합구조물의 RCS 감소를 위한 광대역 다층 전파흡수체 설계

김국현^{†*}, 조대승^{**}, 김진형^{***}

(주)한진중공업 특수선개발팀^{*}
부산대학교 조선해양공학과^{**}, (주)크리에이텍^{***}

Broad-band Multi-layered Radar Absorbing Material Design for Radar Cross Section Reduction of Complex Targets Consisting of Multiple Reflection Structures

Kookhyun Kim^{†*}, Dae-Seung Cho^{**} and Jin-Hyeong Kim^{***}

Hanjin Heavy Industries and Constructions, Co., Ltd.^{*}
Pusan National Univ.^{**}, Createch, Co., Ltd.^{***}

Abstract

An optimum design process of the broad-band multi-layered radar absorbing material, using genetic algorithm, is established for the radar cross section reduction of a complex target, which consists of multiple reflection structures, such as surface warships. It follows the successive process of radar cross section analysis, scattering center analysis, radar absorbing material design, and reanalysis of radar cross section after applying the radar absorbing material. It is demonstrated that it is very effective even in the optimum design of the multi-layer radar absorbing material. This results from the fact that the three factors, i.e., the incident angle range, broad-band frequencies, and maximum thickness can be simultaneously taken into account by adopting the genetic algorithm.

※Keywords: Radar cross section(RCS), Broad-band multi-layered radar absorbing material(광대역 다층 전파흡수체), Multiple reflection(다중반사), Genetic algorithm(유전자 알고리즘)

1. 서론

수상함정과 같은 복합구조물의 대표적인 RCS (radar cross section) 감소 기법으로는 형상화 (shaping), 차폐(shielding), 전파흡수체(radar absorbing material) 적용 등이 있다. 전파흡수체

적용은 중량증가, 유지보수의 어려움 등의 단점에도 불구하고, 형상화, 차폐 등의 기법 적용이 현실적으로 불가능한 장비 및 구조물의 문제영역에 대해 부분적으로 적용할 수 있는 장점이 있다.

한편, 수상함정과 같은 복합구조물은 다양한 주파수 대역의 레이더에 의해 노출될 수 있으며, 그 복잡한 형상으로 인해 다중반사에 의한 RCS가 크게 나타나는 특성을 보인다. 이 경우, 특정 주파수와 수직입사에 대해 우수한 성능을 갖는 전파흡수체를 문제영역에 적용하더라도, 큰 효과를 기대하기 힘들다. 이에 최근에는 넓은 주파수 영역과 넓은 입사각에 대해서 우수한 전파흡수성능을 보이는 광대역 다층 전파흡수체의 효과적 설계기법에 대한 연구가 이루어지고 있다.

과거 Salisbury, Graded index, Jaumann, Dallenbach screen 등 전파흡수체의 제작방식에 있어서 다양한 방법들이 제안되었으며(Knott et al. 1993, Vinoy and Jha 1996), 여러 가지 설계 인자를 동시에 고려할 수 있는 simulated annealing (Michielssen and Mittra 1992), 유전자 알고리즘(Michielssen et al. 1993) 등의 광역(global) 최적설계 기법들이 적용되고 있다.

본 연구에서는 광역(global) 최적화 기법중 하나인 유전자 알고리즘을 이용해 실제 복합구조물의 RCS 감소에 활용할 수 있는 광대역 전파흡수체 최적설계방법을 구현하였다. 또한, 실제 수상함정에 탑재되는 장비의 RCS를 감소시키기 위해 RCS 해석과 산란중심 해석을 수행하고 본 연구결과를 활용하여 파악된 문제영역에 적합한 광대역 다층 전파흡수체를 설계·적용하고 RCS 재해석을 통해 그 효과를 고찰하였다.

2. 광대역 다층 전파흡수체 최적 설계

2.1 프레넬 반사계수

Fig. 1에 나타난 바와 같이 복합구조물이 전자기파가 투과 가능한 다중면으로 구성되어 있는 경우, E-편파(E-polarization) 및 H-편파(H-polarization)에 대한 프레넬(Fresnel) 반사계수 R_E 와 R_H 는 식 (1)과 식 (2)로 각각 계산할 수 있다(Vinoy and Jha 1996, Klement et al. 1989).

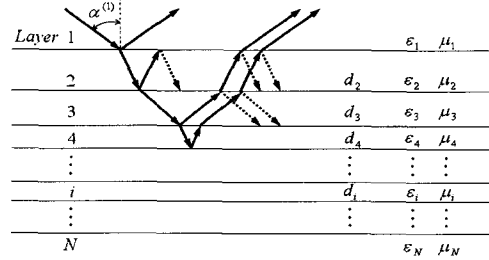


Fig. 1 Geometry of multi-layered surface

$$R_H = \frac{Z^{(1)} \cos \alpha^{(1)} - Z_{iH}^{(2)} \cos \alpha^{(2)}}{Z^{(1)} \cos \alpha^{(1)} + Z_{iH}^{(2)} \cos \alpha^{(2)}} \quad (1)$$

$$R_E = \frac{Z_{iE}^{(2)} \cos \alpha^{(1)} - Z^{(1)} \cos \alpha^{(2)}}{Z_{iE}^{(2)} \cos \alpha^{(1)} + Z^{(1)} \cos \alpha^{(2)}} \quad (2)$$

여기서, $\alpha^{(1)}$ 과 $\alpha^{(2)}$ 는 다층구조 표면에 대한 입사각(incident angle)과 굴절각(refraction angle)을 나타내며, $Z^{(1)}$ 는 공기층의 임피던스(약 377Ω), $Z_{iE}^{(2)}$ 와 $Z_{iH}^{(2)}$ 는 공기층과 두 번째 층 사이 표면에 대한 E-편파 및 H-편파 임피던스를 각각 나타낸다.

한편, $Z_{iE}^{(2)}$ 와 $Z_{iH}^{(2)}$ 는 식 (3)과 식 (4)의 반복계산으로부터 구할 수 있다.

$$Z_{iH}^{(n)} = \frac{Z_{iH}^{(n+1)} \cos \alpha^{(n+1)} + Z^{(n)} \cos \alpha^{(n)} \tanh(k^{(n)} d^{(n)} \cos \alpha^{(n)})}{Z^{(n)} \cos \alpha^{(n)} + Z_{iH}^{(n+1)} \cos \alpha^{(n+1)} \tanh(k^{(n)} d^{(n)} \cos \alpha^{(n)})} Z^{(n)} \quad (3)$$

$$Z_{iE}^{(n)} = \frac{Z_{iE}^{(n+1)} \cos \alpha^{(n+1)} + Z^{(n)} \cos \alpha^{(n)} \tanh(k^{(n)} d^{(n)} \cos \alpha^{(n)})}{Z^{(n)} \cos \alpha^{(n+1)} + Z_{iE}^{(n+1)} \cos \alpha^{(n)} \tanh(k^{(n)} d^{(n)} \cos \alpha^{(n)})} Z^{(n)} \quad (4)$$

여기서, n 과 N 은 해당 층 번호와 총 층수를 나타내며, $\alpha^{(n)} (= \cos^{-1} \{ \sqrt{1 - \mu_r^{(n)} \epsilon_r^{(n)} / (\mu_r^{(n)} \epsilon_r^{(n)} \sin^2 \alpha^{(1)})} \})$ 는 n -번째 층의 공기층에 대한 상대입사각, $k^{(n)} (= \omega_0 \sqrt{-\epsilon_0 \epsilon_r^{(n)} \mu_0 \mu_r^{(n)}})$ 는 n -번째 층에서의 파수(wavenumber), $Z^{(n)}$ 는 n -번째 층에 대한 임피던스($= \sqrt{\mu_0 \mu_r^{(n)} / (\epsilon_0 \epsilon_r^{(n)})}$)를 의미하며, 특히, $n=N$ 인 경우, $Z_{iE}^{(N)} = Z_{iH}^{(N)} = Z^{(N)}$ 이다. 또한, ω_0 는 전자기파의 각주파수, ϵ_0 와 μ_0 는 공기층의 유전율과 투자율을 각각 나타내며, $\epsilon_r^{(n)} (= \epsilon_r' - j\epsilon_r'')$ 과 $\mu_r^{(n)} (= \mu_r' - j\mu_r'')$ 는 n -번째 층의 비유전율(relative permittivity)과 비투자율(relative permeability), $d^{(n)}$ 은 n -번째 층의 두께를 나타낸다.

2.2 유전자 알고리즘

효율적인 광대역 다층 전파흡수체의 설계를 위해서는 전파 흡수성능, 주파수 범위, 입사각도, 층수, 두께, 중량 등의 설계인자들을 종합적으로 고려한 최적설계가 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 광역(global) 최적화 알고리즘인 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 적용하였다.

(1) 설계변수의 이산화와 부호화

유전자 알고리즘은 이산화(discretized)되고 부호화(coded)된 설계변수에 의해 작동된다. 전파흡수체는 각 층의 재료번호와 두께정보를 갖는 비트(bit)의 배열형태로 부호화된다.

데이터베이스 개수가 $N_m = 2^{N_{mb}}$ 이라면, j -번째 층에 선택된 재료번호는 식 (5)와 같이 N_{mb} 개의 배열(N_{mb} -bit)로 표현할 수 있다. 만약, 데이터베이스에 저장된 재료 수가 N_{mb} 의 승수로 표현되지 않는 경우 ($2^{N_{mb}-1} < N_m < 2^{N_{mb}}$) 동일한 재료의 중복배열로 할당한다.

$$M_j = m_j^1 m_j^2 \dots m_j^{N_{mb}} \tag{5}$$

여기서, M_j 는 j -번째 층에 선택된 재료번호 배열을, m_j^i 는 재료번호 배열의 i -번째 비트 값, N_{mb} 는 두께 배열의 비트 수를 나타낸다.

또한, 연속변수에 해당하는 j -번째 재료의 두께 정보 배열은 일정한 간격으로 이산화하고, 식 (6)과 같이 N_b 개의 배열 데이터로 부호화한다.

$$T_j = t_j^1 t_j^2 \dots t_j^{N_b} \tag{6}$$

여기서, T_j 는 j -번째 층에 선택된 두께 배열, N_b 는 두께 배열의 비트 수를 나타내며, 이때, 선택된 j -번째 층 재료의 실제 두께 t_j 는 식 (7)과 같이 환산된다.

$$t_j = \sum_{i=1}^{N_b} T_e^i t_j^{2^{(i-1)}} \tag{7}$$

여기서, T_e 는 두께 이산화 간격을 나타내며, 식 (5)와 식 (6)으로부터 각 층의 재료번호와 두께정보를 갖는 배열 L_j 는 j -번째 층에 선택된 재료번호

배열 M_j 와 두께 배열 T_j 를 이용해 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$L_j = M_j T_j \tag{8}$$

결국, 전파흡수체 전체 층에 대한 정보가 모두 포함된 배열 G 는 식 (9)와 같이 쓸 수 있으며, 그 비트 수는 $N(N_{mb} + N_b)$ 개가 된다.

$$G = L_1 L_2 \dots L_N \tag{9}$$

(2) 적합도 함수(fitness function)

유전자 알고리즘에서 각 개체들에 대한 적합도(fitness)는 일반적인 최적화 알고리즘에 있어서 목적함수에 해당하는 적합도 함수(fitness function)로 계산되며, 그 값이 크게 나타날수록 최적의 해에 가깝다는 것을 의미한다.

전파흡수체 설계 시 관심주파수 영역에서의 반사를 최소화 뿐 아니라 다층재료의 경량화를 고려할 경우, 적합도 함수 F 는 식 (10)과 같이 정의할 수 있다.

$$F(m_1, t_1, \dots, m_N, t_N) = \min_{\alpha^{(1)}, f} [1 - \min\{R_E(\alpha^{(1)}, f), R_H(\alpha^{(1)}, f)\}] + w [N\rho_{max} T_{max} - \sum_{i=1}^N \rho_i t_i] \tag{10}$$

여기서, m_i 와 t_i 는 i -번째 층에 대한 재료번호와 두께정보를 나타내며, N_e 는 전파흡수체만의 총 층수, $R_E(\alpha^{(1)}, f)$ 와 $R_H(\alpha^{(1)}, f)$ 는 전자기파의 최초 입사각 $\alpha^{(1)}$ 과 주파수 f 에 대한 E-편파 및 H-편파 프레넬 반사계수를 나타낸다. 또한, $\rho(m_i)$ 는 i -번째 선택된 층에 대한 두께밀도(kg/m), ρ_{max} 는 선택된 층들 중 최대 두께밀도, T_{max} 는 각 층에 대한 최대허용 두께, w 는 경량화에 대한 가중치 (≥ 0)를 나타낸다.

본 연구에서는 전파흡수체의 설계에서 있어서 경량화를 고려하지 않고($w=0$) 반사율만을 고려하였다.

(3) 유전자알고리즘의 전개

본 연구에서는 광대역 다층 전파흡수체 설계를 위해 Fig. 2에 나타난 절차에 따라 유전자 알고리

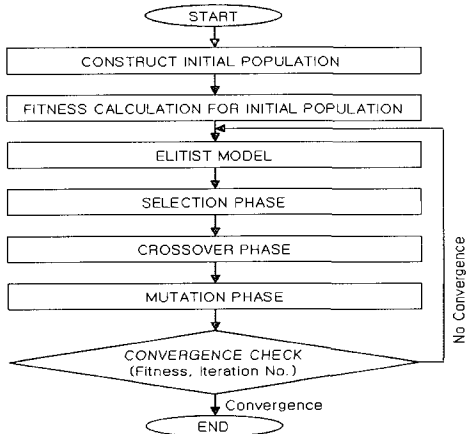


Fig. 2 Flow chart of genetic algorithm

중을 전개하였다. 이때, 2개체 엘리트리스트 모델 (elitist model), 토너먼트 선택 (tournament selection), 1점 교배(one point crossover), 1점 돌연변이(one point mutation) 등의 작동기를 사용하였다.

3. 수치해석 및 고찰

본 연구방법의 실제 복합구조물에 대한 응용 가능성을 살펴보기 위해 수상함정의 근접방어 시스템 중 하나인 SAAM 발사대(Hooton 1999)에 대한 RCS와 피크 발생부위에 대한 산란중심을 해석하고, 이로부터 도출된 문제영역에 적합한 다층 전파 흡수체를 설계하였다. 또한, 설계된 전파흡수체를 문제영역에 적용할 때의 RCS 감소효과를 재해석을 통해 확인하였다(Fig. 3).

해석모델은 Fig. 4에 나타낸 바와 같으며, 발사대와 받침대의 이중반사구조(①~④)에 의해 특정 고각과 방위각에서 큰 RCS를 갖는 피크가 나타나는 구조로 되어 있다.

해석모델에 대한 초기 RCS 해석은 고주파수 후방산란파. 해석에 효과적인 것으로 알려진 기하광학/물리광학 혼합방법(김국현 등 2005a, 김국현 등 2005c, 김국현 2007)을 적용하여 주파수 18 GHz, 고각 8도, 전방위각에 대해 1도 간격으로, W-편파 성분만을 고려하여 수행하였다. 수치해석 결과는 Fig. 5에 나타내었으며, 방위각 58, 122,

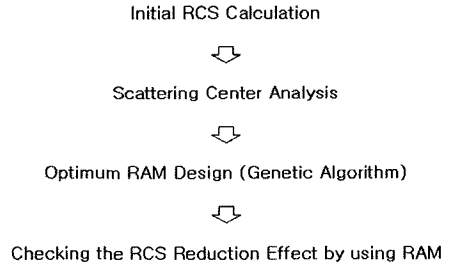


Fig. 3 Optimum design procedure of radar absorbing materials(RAM)

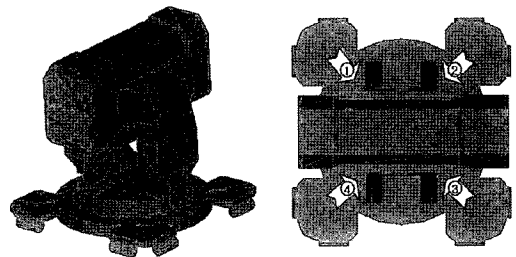


Fig. 4 SAAM and its dihedral structures

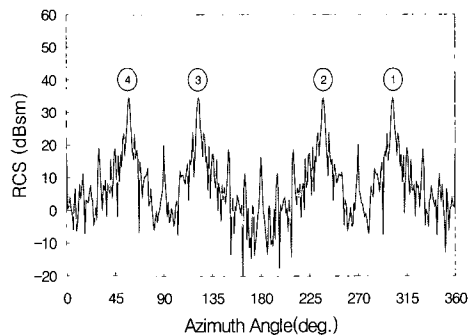


Fig. 5 Initial radar cross section analysis result for SAAM at 18 GHz

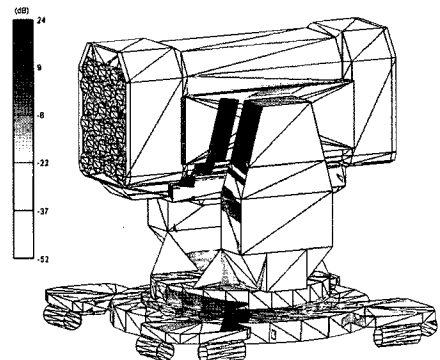


Fig. 6 Scattering center analysis result for SAAM

238, 302도 등의 입사각에서 34.5 dBsm 의 피크 들이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 피크들의 원인을 규명하기 위해 김국현 등(2005b)이 제안한 직접해석방법을 이용해 산란 중심 해석을 수행하고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이로부터 피크의 원인이 Fig. 4에 번호로 표시된 바와 같이 대상표적의 발사대 옆면과 측면 받침대에 의한 이중반사의 영향을 알 수 있다.

한편, 파악된 문제영역에 대한 RCS 감소를 위해 Table 1에 명시된 조건에 따라 유전자 알고리즘을 이용한 최적전파흡수체를 설계하였다. 일반적으로 유전자 알고리즘을 이용한 다층 전파흡수체 설계에서는 초기 개체수는 30에서 100 사이의 값, 교배확율은 0.4에서 0.9 사이의 값, 돌연변이 확률은 0.01에서 0.1 사이의 값을 적용한다 (Michielssen et al. 1993). 본 연구에서는 그 최대값들인 초기 개체수 100, 교배확율은 0.9, 돌연변이 확률 0.1을 적용하였다.

참고로, 실제 발사대 옆면은 방열판이 부착되어 있어서 전파흡수체의 적용이 용이하지 않으므로, 전파흡수체는 측면 받침대 해당부위에만 적용하는 것으로 하였다. 이때, 해당부위에 대한 전자기파의 입사각도는 50도에서 60도 사이의 값을 확인하였으며, 전파흡수체 재료특성은 Michielssen의 물성자료(Michielssen et al. 1993)를 활용하였다.

본 연구방법을 적용하여 문제영역에 대한 최적 전파흡수체를 설계한 결과 Table 2와 같이 각 층에 대한 물성치와 두께를 구할 수 있었다. 이때, 입사각도에 따른 전파흡수체의 E-편파 및 H-편파 반사특성(reflectivity; $20\log_{10}|R_H|$, $20\log_{10}|R_E|$)은 Fig. 7에 나타낸 바와 같으며, 설계된 전파흡수체의 성능은 수직입사에 대해 12dB 정도로 나타나지만, 해당 입사각도 50도~60도에 대해서는 8~10dB 정도로 나타나 입사각도 차이에 따른 성능 차이가 있음을 확인할 수 있다.

한편, 해석모델의 문제영역에 설계된 전파흡수체 적용시의 효과를 확인하고자 RCS 재해석을 수행하였다. Fig. 8은 전파흡수체 적용전과 적용후의 RCS 해석결과를 함께 비교한 것으로, 전파흡수체의 RCS 감소 효과가 약 8.5dB까지 있음을 확인할 수 있다.

Table 1 Calculation parameters for a genetic algorithm

Number of Layer	5
Population	100
Probability of Crossover	0.9
Probability of Mutation	0.1
Allowable Thickness	1.6 mm/Layer
Thickness Discreteness Step	0.1 mm
Maximum Iteration No.	200
Design Freq. Range	4 ~ 18 GHz
Design Incident Angle	50 ~ 60 Deg.

Table 2 Optimum design result of multi-layer radar absorbing material at 18 GHz

Layer No.	Thick. (mm)	Permittivity ϵ_r	Permeability μ_r
1	0.3	15.0000	0.9108-4.6840j
2	0.4	1.0554-0.4982j	1.0000
3	1.3	0.4151-1.5447j	1.0000
4	1.1	15.0000	0.0923-1.6615j
5	0.1	0.4151-1.5447j	1.0000

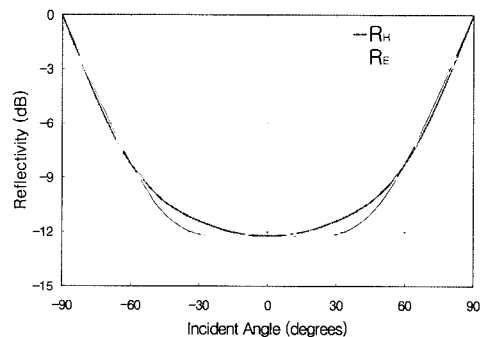


Fig. 7 Reflectivity of the optimized multi-layer absorbing material according to the incident angles at 18 GHz

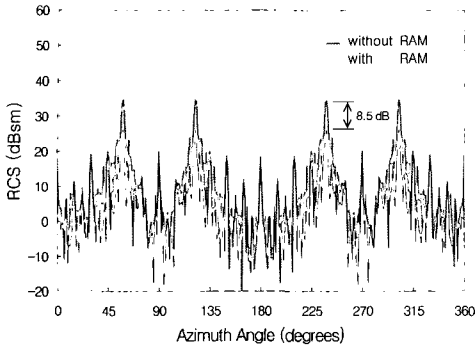


Fig. 8 Radar cross section re-analysis result after applying the optimized radar absorbing material

4. 결론

본 연구에서는 광역(global) 최적화 기법중 하나인 유전자 알고리즘을 이용해 실제 해양표적의 RCS 감소에 활용할 수 있는 광대역 전파흡수체 최적설계방법을 제시하였다. 또한, 이를 이용하여 수상함정의 근접방어체계 중 하나인 SAAM 발사대의 문제영역에 적용하고 그 효과를 고찰하였다.

유전자 알고리즘을 이용한 전파흡수체 최적 설계 방법은 RCS가 과도하게 나타나는 입사각 범위와 복수 주파수를 동시에 고려할 수 있으며, 다층 전파 흡수체의 효율적 최적 설계에 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다. 한편, 향후 실험 또는 실측자료에 대한 비교연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었으며, 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김국현, 김진형, 조대승, 2005a, "Object Precision 방법을 이용한 복합구조물의 RCS 해석," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 2호, pp. 159-164.

- 김국현, 김진형, 조대승, 2005b, "복합구조물의 RCS 저감을 위한 효율적 산란중심 해석에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 4호, pp. 421-426.
- 김국현, 조대승, 김중철, 2005c, "수중표적에 대한 고주파수 음향산란 해석," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 5호, pp. 528-533.
- 김국현, 2007, 해양표적의 고주파수 후방산란 해석과 응용, 부산대학교, 박사학위논문.
- Hooton, E.R., 1999, Jane's Naval Weapon Systems, Jane's Information Group.
- Klement, D., Preissner, J. and Stein V., 1988, "Special Problems in Applying the Physical Optics Method for Backscatter Computation of Complicated Objects," IEEE Trans. Ant. Prop., Vol. 36, No. 2, pp. 228-237.
- Knott, E.F., Guley, M.T. and Shaeffer, J.F., 1993, Radar Cross Section, 2nd Ed., Artech House Publisher.
- Michielssen, E. and Mittra, R., 1992, "RCS Reduction of Dielectric Cylinders Using the Simulated Annealing Approach," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 2, No. 4, pp. 146-148.
- Michielssen, E., Sajer, J.M., Ranjithan, S. and Mattra, F., 1993, "Design of Lightweight, Broad-Band Microwave Absorbers Using Genetic Algorithms," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 41, No. 6/7, pp. 1024-1031.
- Vinoy, K.J. and Jha, R.M., 1996, Radar Absorbing Material: From Theory to Design and Characterization, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Boston, USA.



< 김 국 현 > < 조 대 승 > < 김 진 형 >