

환경감쇠인자를 고려한 레이더 탐지 확률 변화에 관한 연구

김영웅 · 박상철*

Study on the Radar Detection Probability Change Considering Environmental Attenuation Factor

Young-Woong Kim · Sang-Chul Park*

ABSTRACT

The detection field is an important sector of the factors influencing the battle field. Basically, The radar emits a radio wave to perform the detection in the existing way. However, When most existing radars identify target by signal processing to return radio wave, Environmental attenuation factor does not reflected. The radar using this radio wave has got the possibility changing detect result depending on attenuation factor by environmental conditions, The operational problems may arise in a real battle field. Therefore, In this paper, When emitted radio waves were come back, Reflecting the environmental attenuation factor, Experimental attempts to identify the target to enable more accurately.

Key words : Radar Equation, Detection of Probability, Environmental Attenuation, Environmental Condition, Environmental Factor

요 약

탐지 분야는 전장에 영향을 미치는 요인들 중 중요한 부분이다. 기본적으로 레이더는 정해진 방향으로 탐지를 수행하기 위해 전파를 방출한다. 그러나 기존의 레이더들 대부분이 돌아온 전파를 이용해 신호처리 과정에 의해 표적을 확인할 때, 환경 감쇠 요소는 반영되지 않는다. 이러한 전자파를 이용하는 레이더는 환경적 조건에 의한 감쇠요인에 따라 탐지 결과가 달라질 수 있는 가능성을 가지고 있어, 실제 전장에서 작전상 문제가 발생할 수도 있다. 그렇기 때문에, 이 논문에서는 전파가 돌아올 때, 기존의 레이더 방정식에 환경 감쇠 요인을 반영하여 더 정확한 표적을 확인하기 위한 시도를 해보고자 한다.

주요어 : 레이더 방정식, 탐지 확률, 환경 감쇠, 환경 조건, 환경 요인

1. 서 론

미래전은 산업화시대의 전쟁양상과 근본적으로 다른 정보전쟁, 네트워크중심전쟁, 장거리 정밀전쟁 등의 새로운 전쟁개념으로 발전될 것이다¹⁾. 이러한 미래전에서 전장에 영향을 미치는 요소 중 중요한 분야로서 탐지 분야가 있다. 표적에 대한 보다 정확한 탐지·추적은 적군에 대한 살상을 뿐만 아니라, 나아가 아군의 생존율과도 직결

된다. 이러한 이유 때문에 2010년 북한의 연평도 포격 도발 이후 제대로 작동하지 않고 가동하는데 시간도 오래 걸렸던 기존의 대포병 레이더 AN/TPQ-37을 즉각적인 대응을 위하여 최신형 대포병 레이더 Arthur로 교체하였다. 그리고 탐지를 위한 레이더운용에 무시할 수 없는 영향을 끼치는 것이 환경감쇠이다.

레이더는 목표물을 향해 전자파를 발사해서 목표물에 부딪혀 후방에 산란되어 되돌아오는 전자파를 수신한다. 이러한 전자파를 사용하는 무기체계는 정밀성에 있어서 기존의 무기체계보다 월등한 능력을 가지고 있다. 전자 항공전을 구성하는 전투기, 폭격기, 지상관제 레이더, 대공 미사일, 대지 미사일, 대지 유도 폭탄 등의 높은 정밀성은 실제 운용에 있어서 환경의 영향을 받아 그 성능

Received: 2 November 2015, **Revised:** 20 November 2015,
Accepted: 27 November 2015

*Corresponding Author: Sang-Chul Park
E-mail: scpark@ajou.ac.kr
Ajou University, Modeling & Simulation

의 감소, 운용의 제한 등 작전상의 문제가 발생한다²⁾.

실제로 1990년 걸프전에서 영국군은 전략 사령부에 기상 예보센터를 설치하여 중동 지역의 기상정보를 수집·분석한 데이터를 기반으로 기상 예보 모델을 구축하여 군용기의 항로 지원이나 작전 수행, 작전 계획 수립에 활용함으로써 현대전에서 환경적 요소가 차지하는 비중이 갈수록 높아진다는 사실을 잘 입증해주었다³⁾. 그러나 현재 군에서 운용하고 있는 탐지레이더 자산들은 환경요소를 제대로 반영하고 있지 않고 레이더 내부로 들어온 신호 처리 과정에서 레이더 자체적인 기계적 판단, 혹은 레이더를 운용하는 레이더 운용병의 주관적 판단으로 환경요인을 감안한 신호분석을 하고 있어 표적에 대한 정확한 위치획득에 어려움이 있다. 이러한 부정확한 환경감식에 대한 신호해석을 줄이고 보다 정확한 환경감식의 반영을 위해 신호 처리 과정 전 레이더 수신단에 들어오는 신호를 환경감식 값을 고려한 레이더 신호 세기로 만들기 위한 새로운 Equation을 도출하고, 표적에 대한 탐지확률을 도출하고자 한다.

2. 환경 감식 인자

2.1 신호감식 요인

대기 중에서 사용되는 무기체계의 레이더 전자파는 산소 및 습도에 의한 감쇠를 갖는다. 감쇠는 레이더 전자파가 대기 중을 진행함에 따라 에너지가 강수입자, 구름입자, 먼지, 연기등과 상호 작용할 때 에너지 손실이 일어나게 되는데 이러한 에너지 손실을 감쇠라고 한다⁴⁾. 환경감쇠는 여러 가지 요인들로 이루어져 있는데 크게는 지상조건, 해상조건, 기상조건, 그리고 기타로써 4가지로 나눌 수 있다. 지상조건은 인공구조물, 차량, 숲, 산, 사막 등의 지형과 이로 인해 발생하는 불필요한 반사파에 의해 나타나는 echo 등의 반사장해를 말한다. 해상조건은 전파가 해면과 만나 반사가 일어나 표적 고각이 왜곡되거나 해면에 반사되어 나타나는 echo로 해상 Clutter가 나타남을 말한다. 그리고 기상조건은 비, 공기, 수증기 등의 조건에 따라 감쇠가 일어나는 것을 말하며, 태양에 의한 태양 복사에너지나, 고에너지 입자, 코로나 물질 방출에 의해서도 통신 장애가 생기는 등 영향을 받는다. 마지막으로 고도나 온도 등에 따라서도 감쇠효과가 일어나게 된다. 이러한 감쇠 요인과 더불어 표적의 은폐, 또는 반사 신호를 약하게 하는 요인 중 하나로 반사 표면이 있다. Fig. 1을 보면 알 수 있듯이 1,2번과 같이 표면이 매끄럽다면 전파는 표면의 각도에 따라 반사되지만, 3,4번과 같이 표면이 거

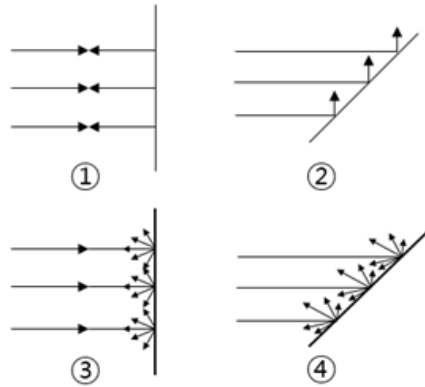


Fig. 1. The kind of wave reflection of surface

칠다면 난반사가 일어나 레이더로 수신되는 신호가 약화된다.

2.2 환경감쇠를 반영한 Radar Equation

기본적인 레이더 수신 입력단에서 수신되는 반사 신호 전력은 다음과 같다.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \tag{1}$$

여기서 P_t 는 송신기 출력, G_t 는 송신안테나 이득, G_r 는 수신 안테나 이득, R 는 레이더와 표적 간 거리, σ 는 표적의 레이더 반사 단면적, λ 는 $\frac{c}{f}$ 로써 c 는 광속, f 는 주파수를 의미한다.

이 식을 dB단위로 변환하기 위해 로그스케일로 나타내면 다음 식 (2)와 같이 변형할 수 있다.

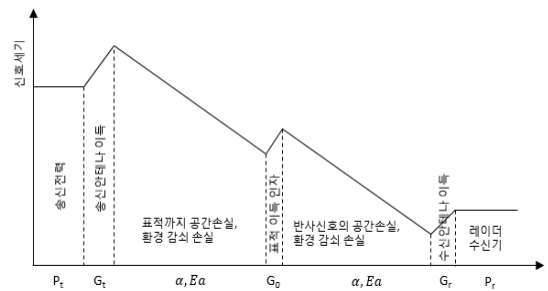


Fig. 2. Schematization of radar equation

$$10\log P_r = 10\log P_t + 10\log G_t + 10\log G_r + G_\sigma - 2\alpha_1 - E_a \quad (2)$$

식 (2)에서 공간손실 부분에 환경 감쇠손실 E_a 을 추가로 넣어준다. 그리고 위 식을 그림으로 나타내면 위 그림 Fig. 2와 같다.

2.3 반영 환경 감쇠 인자

레이더 신호 손실은 시스템의 송수신에서 단계별 신호 처리와 연관된다. 전송 손실의 원인으로는 전력 송신 효율, 도파관과 안테나 손실 그리고 듀플렉서 손실이 있으며, 수신시에는 안테나, 도파관, 고주파 증폭기, 혼합기와 중간 주파수 증폭기에 의한 손실이 발생한다. 전파의 전달 특성은 송신기와 수신기 간의 경로 특성에 크게 의존한다. 전파는 대기 중을 전파하면서 전파 방해물이나 대기권의 굴절을 변화 등으로 인해 흡수, 반사, 회절, 산란 등의 영향을 받는다. 즉, 송신기와 수신기 간에 가시거리 경로가 형성되지 않더라도 회절 현상에 의해 전파가 전달될 수 있고, 대기 굴절율의 공간적인 미세한 차이나 강우 등은 전파전파에 있어서 산란을 야기하는 요소로서 작용한다⁵⁾. 이런 손실뿐만 아니라 대기를 통과하여 전파되는 에너지는 기본적으로 기체에 의한 흡수로 발생하는 대기 감쇠에 영향을 받는다. 낮은 주파수 대역에서는 감쇠가 예측 가능하지만, 밀리미터파 대역의 높은 주파수에서는 감쇠가 증가하는 것뿐만 아니라 수분, 산소 등의 흡수 특성에 의해 더 좌우 된다. 전파는 대기권을 진행할 때, 대기를 구성하는 원자나 분자들과 상호작용한다. 이때 특정한 주파수의 전파는 특정한 대기구성 원자나 분자들과 공진할 수 있으며 이로 인해 특정 주파수의 전파에 높은 손실 값을 야기한다. 그렇기 때문에 대기로 인한 감쇠 손실 값을 계산하는 것이 필요하다. ITU-Radiowave Propagation.676에 따라 기압, 온도를 이용하여 1~1,000 GHz까지의 주파수 범위에 대해 대기의 흡수손실 계수를 얻을 수 있다. 또한, ITU-Radiowave Propagation.838에 따라 강우감쇠계수를 얻을 수 있다. 이 외에도 다양한 환경 요인이 신호 세기 약화에 영향을 미칠 수 있지만 본 연구에서는 가장 기본적인 면에서도 쉽게 영향을 미칠 수 있는 온도, 기압, 강우량만을 고려하여 레이더 수신 강도 변화에 대해 알아보려고 한다.

3. 감쇠 계수 값 도출 및 결과 분석

3.1 감쇠 계수

환경 감쇠 인자를 선정하였으면 이를 이용하여 감쇠 계

수 값을 구할 수 있다. 감쇠 계수 값을 구하기 앞서 계산을 좀 더 편하고 알기 쉽게 만들기 위해 기압은 1기압인 1,013 hPa, 온도는 15°C, 강우량은 100 mm, 사용 주파수는 20 GHz, 전파의 진행은 10 km로 설정하기로 한다.

먼저 대기 흡수 손실 계수를 얻기 위한 식은 다음 식 (3)과 같다.

$$\gamma_\alpha d = (\gamma_w + \gamma_o) d \quad (3)$$

γ_α 는 대기 흡수감쇠 계수, γ_w 는 건조한 대기감쇠 계수, γ_o 는 수증기 감쇠 계수, d 는 경로 길이를 의미한다. 이 중 건조한 대기 감쇠 계수는 350 GHz 이하의 주파수에서 건조한 대기에 의한 손실은 주로 산소분자에 기인하므로 산소 감쇠계수라고 할 수 있다.

산소 감쇠 도출 모델은 다음과 같다.

$$f \leq 54 \text{ GHz 일 때,} \quad (4)$$

$$\gamma_o = \left[\frac{7.2r_t^{2.8}}{f^2 + 0.34r_p^{2.16}} + \frac{9.62\xi_3}{(54-f)^{1.16\xi_1} + 0.83\xi_3} \right] f^2 r_p^2 10^{-3}$$

감쇠 계수를 구하기 위해 필요한 상관 계수 ξ_1, ξ_3 를 구하기 위한 공식은 다음과 같다.

$$\xi_1 = \phi(r_p, r_t, 0.0717, -1.8132, 0.0156, -1.6515) \quad (5)$$

$$\xi_3 = \phi(r_p, r_t, 0.3414, -6.5851, 0.2130, -8.5854)$$

$$\phi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1-r_p) + d(1-r_t)]$$

f 는 사용하는 주파수, r_p 는 $p/1013$, r_t 는 $288/(273+t)$, p 는 대기압력(hPa), t 는 온도이다.

기준 값을 이용하여 공식에 대입하여 산소 감쇠 계수는 0.0112가 나옴을 알 수 있다.

다음은 수증기 감쇠 계수를 구하기 위한 수증기 감소 도출 모델은 다음 식 (6)과 같다.

$$\gamma_w = \frac{3.98\eta_1 \exp[2.23(1-r_t)]}{(f-22.235)^2 + 9.42\eta_1^2} g(f, 22) \quad (6)$$

$$+ \frac{11.96\eta_1 \exp[0.7(1-r_t)]}{(f-183.31)^2 + 11.14\eta_1^2} + \frac{0.081\eta_1 \exp[6.44(1-r_t)]}{(f-321.226)^2 + 6.29\eta_1^2}$$

$$+ \frac{3.66\eta_1 \exp[1.61(1-r_t)]}{(f-325.153)^2 + 9.22\eta_1^2} + \frac{25.37\eta_1 \exp[1.09(1-r_t)]}{(f-380)^2}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \frac{17.4\eta_1 \exp[1.46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\
 &+ \frac{844.6\eta_1 \exp[0.17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f, 557) \\
 &+ \frac{290\eta_1 \exp[0.41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f, 752) \\
 &+ \frac{8.3328 \times 10^4 \eta_2 \exp[0.41(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f, 1780)
 \end{aligned}$$

감쇠 계수를 구하기 위해 필요한 상관 계수 η_1, η_2 를 구하기 위한 공식은 다음과 같다.

$$\eta_1 = 0.955r_p r_t^{0.65} + 0.006\rho \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 \eta_2 &= 0.735r_p r_t^{0.65} + 0.0353r_t^4 \rho \\
 g(f, f_i) &= 1 + \left(\frac{f-f_i}{f+f_i}\right)^2
 \end{aligned}$$

상관 계수 η_1, η_2 를 구하기 위해서는 수증기 밀도(ρ)를 알아야 하는데 본 연구에서 수증기 밀도는 10 g/m^3 으로 설정하기로 한다. 기준 값을 이용하여 위 공식에 대입한다면 수증기 감쇠 계수는 0.1359가 나옴을 알 수 있다.

식 (2)번에 따라 대기 흡수 손실 계수는 산소 감쇠 계수와 수증기 감소 계수 값을 더한 값이므로 $\gamma_R = 0.1471$ 이다. 전파가 10 km 진행하며 감소된 값을 구하는 것이므로 최종 대기 흡수 손실 값은 1.471(dB)가 된다.

다음 강우량 감쇠 계수를 구하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 k &= [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2 \\
 \alpha &= [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau] / 2k
 \end{aligned}$$

k 와 α 는 주파수와 편파에 따른 상관계수 이며 θ 는 레이더의 고도각을 의미하며 τ 는 수평편파에 대한 상대 편파각으로 각각 45° 로 설정하였다. 그리고 ITU-R P.838에는 1~1,000 GHz까지 상관 계수들의 값을 표로 나타내 주고 있으며 그 중 현재 기준 주파수에 맞는 부분을 일부 발췌한 표는 다음 Table 1과 같다.

20 GHz에 해당하는 상관 계수들을 이용하여 k 와 α 를 구하면 각각 0.0938, 1.0207이다. 해당 계수 값들을 이용해 최종 강우 감쇠 값을 구하면 10.3181(dB)가 된다. 그러므로 전체 대기 흡수, 강우 감쇠 값은 총 11.7891(dB)

Table 1. Frequency-dependent coefficients for estimating specific rain attenuation using equation

Frequency (GHz)	k_H	α_H	k_V	α_V
18	0.07078	1.0818	1.07708	1.0025
19	0.08084	1.0691	0.08642	0.9930
20	0.09164	1.0568	0.09611	0.9847
21	0.1032	1.0447	0.1063	0.9771
22	0.1155	1.0329	0.1170	0.9700

로 해당 감쇠 값만큼 레이더 신호세기가 약해짐을 알 수 있다.

3.2 탐지확률 도출 및 결과 분석

감도는 두 가지로 정의 내릴 수 있기 때문에 종종 혼동을 일으킬 수 있다. 입력에 대한 응답의 비 또는 응답에 대한 입력의 비가 될 수 있다. 수신기에서 가장 일반적으로 사용되는 첫 번째 방법에 있어서 감도는 dBm으로 표현시에 음수가 될 것이며, 더 큰 음수일수록 감도는 좋아진다. 즉, -60dBm은 -50dBm보다 더 좋은 감도이다^[6].

탐지확률(P_d)은 아래의 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 레이더 수신단으로 들어오는 전파는 주파수 대역대, 혹은 레이더 자산자체에 끼인 잡음이 더해져 들어오게 된다. 그리고 각 레이더에는 해당신호가 표적인지 아닌지를 판명하기 위한 Threshold값이 정해져 있다. 레이더 수신단에 들어온 신호의 세기가 이 문턱 값보다 크다면 이것을 표적으로 판단한다. 그리고 들어온 신호가 이 문턱 값을 넘어 표적으로 판단될 확률이 탐지확률이다. 오경보 확률(P_{fa})은 잡음이 threshold를 넘어 표적으로 판단될 확률이 된다. 오경보 확률을 구하는 것은 평균 잡음 세기를 이

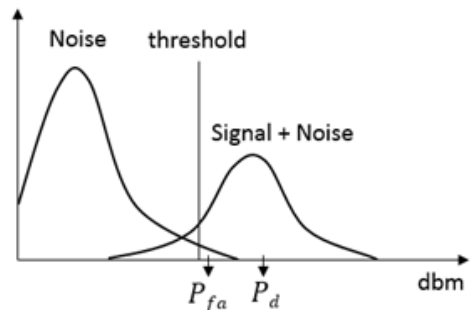


Fig. 3. Judgement of detection probability

용하여 구할 수 있다.

결론적으로 앞의 식 (2)번을 사용한다면 식 (3)~(8)번 과정을 통해 얻은 환경 감쇠 값이 레이더 전자파가 레이더와 표적 사이의 공간을 지나가며 생기는 공간손실부분에 반영되어 마이너스 값을 가지게 되고 최종적으로 레이더 수신단에 들어오는 신호세기는 환경 감쇠를 반영하기 전보다 더 큰 음수가 나올 것이다. 그리고 어떤 신호든 들어올 때 해당 신호는 주파수 고유의 잡음을 가지게 되는데, 이 잡음의 평균 잡음 세기를 구하고, 수신단에 들어온 신호에 더해 최종적인 신호와 잡음의 평균값을 구한다. 이 값과 사용한 레이더 자산의 Threshold 값의 비로 Signal+Noise 값이 Threshold값을 넘을 확률을 구할 수 있는데, 이것이 바로 탐지확률이 된다. Fig. 3을 참고하여 살펴본다면 환경 감쇠 값을 고려한 그래프는 그렇지 않은 그래프 보다 threshold 우측으로 이동하므로 환경 감쇠를 고려한 탐지확률은 기존의 탐지확률보다 더 높고 정확한 값이라고 할 수 있을 것이다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 환경감쇠를 고려했을 때 레이더 수신단에서의 신호세기에 관한 연구를 진행하였다. 이에 따라 레이더에서 송출된 전파가 진행함에 따라 받는 환경감쇠인자에 대해 알아보고, 이중 가장 기본적인면서도 쉽게 탐지에 영향을 미칠 수 있는 온도, 기압, 강우량을 선택하고 해당 환경 감쇠 인자로 인해 줄어드는 감쇠 값을 도출하고, 해당 신호 감쇠 도출 값을 반영할 수 있는 방정식을 만들어 레이더 수신단에서의 신호세기 변화를 살펴보았다.

연구결과를 살펴보면 환경감쇠인자를 고려한 레이더 신호는 그렇지 않은 신호보다 더 좋은 감도가 나타났으며 레이더와 표적이 움직이지 않는 static한 상황 하에서는 탐지확률이 올라가는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구는 기존의 레이더 관련 이론에서 많이 고려되지 않았던 환경요소를 고려했다는 것에 의의를 둘 수 있다. 하지만 현재 군에 도입된 신형 레이더는 표적을 추적할 수 있는 기능들이 있어 본 연구에서 쓰인 기본적인 레이더 수식으로는 이를 표현하기에 무리가 있는 것이 사실이다. 이러한 한계점을 고려하여 향후 이러한 요소를 반영하여 탐지확률을 구할 때 레이더와 표적이 움직일 경우의 Dynamic한 상황을 고려한 탐지확률 분석이 추가된다면 더 좋은 결과

를 얻을 수 있을 것이다.

분단이라는 특수한 상황과, 계속되는 북한의 도발을 미연에 방지하기 위해 감시, 정찰의 정보전력이 갈수록 중요해지고 있는 상황에서 레이더를 포함한 영상, 소나 등의 표적 탐지 장비의 중요성은 누구나 공감하며 해당 기술분야의 발전은 필수 불가결한상황이라고 생각한다. 따라서 앞으로도 표적 추적 확률 향상 방안 등의 더 개선된 연구를 진행한다면 보다 유용한 결과를 도출할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소(UD110006M D), 및 교육 과학 기술부에 의해 지원되는 국가 연구 재단 보조금(NRF-2015R1A2A2A01005871)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. J.S. Hwang, T.W. Kang (2011), "Study C4ISR systems built using commercial technologies", Korea Institute for Strategic 2001 Battle army experiment, 2001.11, pp. 219-268.
2. Ryu, Lee, "Radar meteorology", Sigmappress, 2009.
3. Ban, "War and Weather", Myungjinbooks, 2001
4. K.R., Yang (2013), "Environmental Data Management and Supply Plan for Building Synthetic Battlefield Environment of Air Combat Simulation", Journal of the Korea society for simulation, Vol. 22, No. 3, pp. 7-14.
5. Y.G. Lee, "Domestic radio propagation characteristics and propagation environments Characteristics", pp. 88-89, 2001.
6. I.G. Lee, Radar Engineering and Applications in Electronic Warfare, daeyoungsa, 2006.
7. ITU-R. (2013). ITU-R P. 676-9 : Attenuation by atmospheric gases, Radiocommunication sector of ITU.
8. ITU-R. (2005). ITU-R P. 838-3 : Specific attenuation model for rain for use in prediction methods, Radiocommunication sector of ITU.
9. Wikipedia. AN/TPQ-37, from https://en.wikipedia.org/wiki/AN/TPQ-37_Firefinder_radar accessed on 10-16-2015
10. Wikipedia. ARTHUR, https://en.wikipedia.org/wiki/ARTHUR_radar accessed on 07-08-2015



김영웅 (duddn1237@ajou.ac.kr)

2014 아주대학교 산업정보시스템공학부 학사
2015~현재 아주대학교 대학원 산업공학과 석사과정

관심분야 : 국방M&S, 분산 시뮬레이션



박상철 (scpark@ajou.ac.kr)

Ph.D. (2000) in Industrial Engineering, Dept of I.E., KAIST, Korea
B.S. (1994) in Industrial Engineering, Dept of I.E., KAIST, Korea
M.S. (1996) in Industrial Engineering, Dept of I.E., KAIST, Korea
2000년 9월~2001년 12월 큐빅테크, 선임연구원
2002월 1년~2004년 2월 DaimlerChrysler ITM Dept. Research Engineer
2008년 2월~현재 아주대학교 산업정보시스템 공학부, 부교수

관심분야 : 시뮬레이션, 제조 시스템, 이산사건 모델링, CAD/CAM, PLC