

수동소나시스템에서 탐지효과도 분석

Measure of Effectiveness Analysis of Passive SONAR System for Detection

조 정 홍 김 재 수
Jung-Hong Cho Jea Soo Kim

Abstract

The optimal use of sonar systems for detection is a practical problem in a given ocean environment. In order to quantify the mission achievability in general, measure of effectiveness(MOE) is defined for specific missions. In this paper, using the specific MOE for detection, which is represented as cumulative detection probability(CDP), an integrated software package named as Optimal Acoustic Search Path Planning(OASPP) is developed. For a given ocean environment and sonar systems, the discrete observations for detection probability(PD) are used to calculate CDP incorporating sonar and environmental parameters. Also, counter-detection probability is considered for vulnerability analysis for a given scenario. Through modeling and simulation for a simple case for which an intuitive solution is known, the developed code is verified.

Keywords : Measure Of Effectiveness(MOE), Detection, Cumulative Detection Probability(CDP), Probability of Detection (PD), Passive SONAR System, Vulnerability, Optimal Acoustic Search Path Planning(OASPP), Sonar-Maneuver Tactic

1. 서론

해양에서 소나를 이용하여 표적에 대한 탐지임무를 수행할 경우, 효율적인 소나운용은 임무성공여부와 직결되며 소나시스템의 성능을 극대화 시킬 수 있는 현실적인 방안이 될 수 있다. 이를 위해 미 해군의 경우 운용소나의 탐지성능 및 기동전술의 효과를 예측하기 위해 효과도(MOE : Measure Of Effectiveness) 분석 개

념을 확립하였고^[1], 지속적인 해상훈련을 통해서 작전해역의 환경정보 자료를 측정 및 수집하고 이를 분석하여 운용 장비 및 전술시나리오에 대한 유효성을 정량적으로 평가하고 있다^[2~6]. 국내에서는 효과도 분석에 대한 연구가 2005년부터 수행되고 있으며^[7~13], 향후 체계적이고 지속적인 연구가 필요하다.

본 논문에서는 작전해역의 해양환경정보를 바탕으로 획득한 수동소나의 음향정보와 자함의 기동시나리오가 주어진 경우, 운용소나의 탐지성능과 기동전술의 효과를 예측하기 위해 취약성을 고려한 탐지효과도 분석을 수행하였다.

탐지효과도 분석은 시간대별 탐지확률을 통합하여

† 2012년 3월 13일 접수~2012년 5월 25일 게재승인

* 한국해양대학교 해양공학과

책임저자 : 조정홍(hong02020320@naver.com)

누적탐지확률(CDP : Cumulative Detection Probability)을 계산함으로써 가능하며^[1,9,13], 탐지효과도 분석을 위해 본 논문에 적용한 누적탐지확률 계산 알고리즘에 대해 기술하였다. 또한, 현실적인 탐지효과도 분석을 위해서 표적에 의해 자함이 피탐지(counter-detection)될 위험성인 취약성 분석^[1]을 수행하였다. 탐지확률 계산을 위해서 판배열소나(표적소나)와 선배열소나(자함소나)의 제원을 이용하여 수치적분법으로 3차원 빔패턴(beam pattern)을 계산하였으며, 소나자세각을 고려한 표적과의 상대방위에 대해 빔조향(beam steering) 기법을 적용하여 작전해역에서 운용소나의 위치와 자세각에 따른 거리 및 방위별 탐지성능을 분석하는 방안을 제시하였다.

기동시나리오에 따른 탐지효과도 분석을 위해서, 주어진 해양환경과 탐지세력의 음향정보를 바탕으로 최적의 음향탐색패턴을 도출하는 OASPP(Optimal Acoustic Search Path Planning) 알고리즘^[7~12]을 이용하여 주어진 표적기동경로에 대한 두 가지 자함기동 시나리오를 생성하여 효과도 분석에 활용하였다. 또한, 유전알고리즘(genetic algorithm)의 다중목적함수(multi-objective function)^[14,15]를 OASPP 알고리즘에 적용하여, 주어진 소나기동경로의 탐지효과도 분석과 취약성 분석을 동시에 고려할 수 있도록 확장하였다.

기동시간대별 표적접촉정보인 탐지확률로부터 누적탐지확률을 계산하여 자함기동경로에 대한 탐지효과도 분석, 취약성분석 및 취약성을 고려한 탐지효과도 분석을 수행하였다.

2. 탐지효과도 이론

효과도 분석은 주어진 해양환경조건과 운용장비 및 자함과 표적의 기동 시나리오 하에서 임무수행에 대한 효과를 정량적인 방법으로 도출하는 것이며, 작전해역의 해양환경정보와 운용소나에 따른 음향정보를 바탕으로 표적에 대한 다양한 임무를 효율적으로 달성하기 위해 필요하다. 효과도 분석에는 임무에 따라 탐지(detection)효과도, 식별(classification)효과도, 위치추정(localization)효과도, 공격(attack)효과도 및 취약성(vulnerability) 분석이 있으며^[1], 본 논문에서는 취약성을 고려한 탐지효과도 분석을 수행하였다. 탐지효과도 분석은 소나기동경로에 따른 각각의 탐지확률(P_d : Probability of Detection)로부터 누적탐지확률(CDP : Cumulative Detection Probability) 계산을 통해 가능함을

확인하였고, 계산방법을 상세히 기술한바 있다^[9,13].

$$CDP_n = 1 - \frac{1 - p_h}{1 - ap_h} \prod_{i=0}^n (1 - ap_i) \quad (1)$$

누적탐지확률을 계산하는 알고리즘에는 5가지가 있으며^[16], 본 논문에서는 누적탐지확률 계산을 위해 식 (1)의 방법을 적용하였다. 식 (1)에서 CDP는 누적탐지확률, p_i 는 i 시점에서의 탐지확률, p_h 는 i 시점까지의 탐지확률 중 최대값이다. 또한, $a = 1 - \exp(-\lambda\Delta)$ 로 정의되며 λ 는 탐지상태에서 벗어날 시간당 비율, Δ 는 각 관측시점에 대한 시간간격을 나타낸다. 따라서 λ 와 Δ 값에 의해서 탐색을 수행하는 소나의 각 관측시점(glimpse)에 대한 상관관계(독립성 또는 종속성)의 정도가 결정된다. Δ 는 소나시스템에 따라 가변적이므로 본 논문의 알고리즘에서 변수로 설정되어 있으며, λ 는 실제 운용하는 소나시스템을 고려하여 설정해야한다. 본 논문에서 시뮬레이션을 위해서 Δ 는 0.1시간(6분), λ 는 1/10으로 하여 효과도 분석을 수행하였다. 취약성분석에는 다양한 항목이 있으며^[1], 본 논문에서는 표적에 의해 자함이 피탐지(counter-detection)되는 위험성을 분석하는 것으로 제한하였으며 식 (1)의 방법을 이용하여 표적의 관점에서 누적탐지확률을 계산하여 적용하였다.

3. OASPP

기동시나리오에 따른 탐지효과도 분석을 위해서 주어진 해양환경과 탐지세력의 음향정보를 바탕으로 최적의 음향탐색패턴을 도출하는 OASPP(Optimal Acoustic Search Path Planning) 알고리즘^[7~12]을 적용하였다. OASPP 알고리즘은 소나의 탐지알고리즘과 복잡한 탐색경로문제에 활용되는 유전알고리즘을 이용하여 개발되었으며, 주어진 해양환경에서 효율적인 탐색경로를 도출함을 입증한 바 있다^[7~12]. 본 논문에서는 OASPP 알고리즘을 이용하여 주어진 표적기동경로에 대한 두 가지 자함기동 시나리오를 생성하여 효과도 분석에 활용하였으며, 현실적인 탐지효과도 분석을 위해서 유전알고리즘(genetic algorithm)의 다중목적함수(multi-objective function)^[14,15]를 OASPP 알고리즘에 적용하여 표적에 의해 자함이 피탐지(counter-detection)되는 위험성인 취약성 분석에 활용하였다.

4. 탐지확률계산

본 논문에서는 소나의 제원에 따른 빔패턴(beam pattern) 및 표적위치에 따른 빔조향(beam Steering) 기법을 적용하여 탐지확률을 계산하였다. 주어진 기동시나리오 하에서, 자함과 표적의 위치 및 상대방위에 따른 탐지확률은 FOM(Figure Of Merit)을 이용하여 도출할 수 있으며, 본 논문에서는 수동소나방정식을 이용하여 식 (2)와 같이 FOM을 계산하였다. 여기서 SL 은 음원준위(Sound Source Level)이며, DI 는 지향지수(Directivity Index), DT 는 측정된 신호가 표적신호인지 결정하는 기준이 되는 탐지문턱(Detection Threshold), DL 은 빔패턴과 표적방위에 따른 방향손실(Directivity Loss) 값을 의미한다.

$$FOM = SL - NL + DI - DT - DL \quad (2)$$

식 (2)로부터 계산된 FOM을 이용하여 식 (3)과 같이 신호초과이득(SE : Signal Excess)을 계산할 수 있다. 식 (3)의 전달손실(TL : Transmission Loss)은 표적의 깊이 z_s , 탐지세력의 센서 깊이 z_r , 표적과 센서간의 거리 r 에 의해 결정되며, 본 논문에서는 거리중속 음파전달모델인 RAM을 이용하여 계산하였다.

$$SE(FOM, r, z_r | z_s) = FOM - TL(r, z_r | z_s) \quad (3)$$

식 (3)으로 계산된 신호초과이득으로 Log-normal 분포를 이용하여 식 (4)와 같이 탐지확률(P_d : Probability of Detection)를 도출할 수 있다^[17]. 여기서 σ 는 신호초과이득의 표준편차이며, 본 논문에서는 해상실험 값인 8~9dB중 8dB를 적용하였다^[18].

$$P_d(SE) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{SE} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (4)$$

본 논문에서는 시뮬레이션을 위해서 판배열(plane array)소나와 선배열(horizontal line array)소나에 대해 탐지확률을 계산하였으며, 판배열은 표적이 탑재한 소나, 선배열은 자함이 탑재하고 있는 소나로 가정하였다. 주파수는 판배열 및 선배열 소나 모두 동일하게 1kHz를 적용하였으며, 판배열소나의 경우 표적함의 양측면에 하나씩 장착되었다고 가정하였다. 식 (2)~(4)를 이용해 계산한 시간에 따른 탐지확률 값으로 부

터 식 (1)과 같이 누적탐지확률을 도출하여 탐지효과도 분석을 수행하였다.

가. 작전해역정보

자함 및 표적이 기동하는 작전해역은 동해이며, Fig. 1의 붉은 선으로 표기된 가로 100km, 세로 100km 영역으로 제한하였다. Fig. 2는 Fig. 1의 작전영역을 확대한 것이며, 파란색 원들은 거리중속 음파전달모델을 이용하여 각 위치에서의 전달손실을 거리/방위에 대해 계산한 지점을 도식화한 것이다. Fig. 1~2의 colorbar는 수심을 나타내며, 전달손실 계산을 위한 수심별 음속분포는 Fig. 3과 같다.

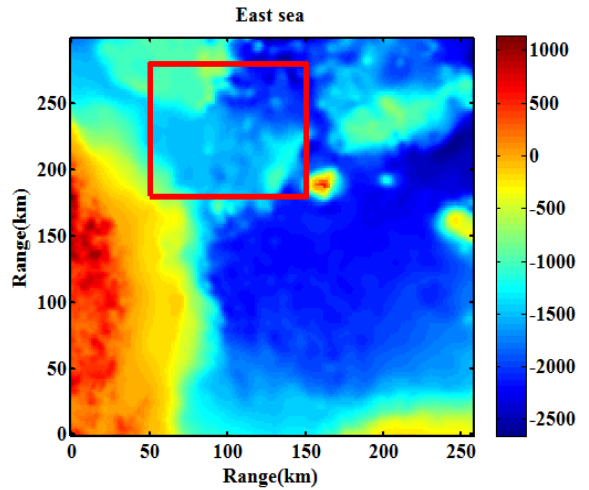


Fig. 1. Geometry of the search space

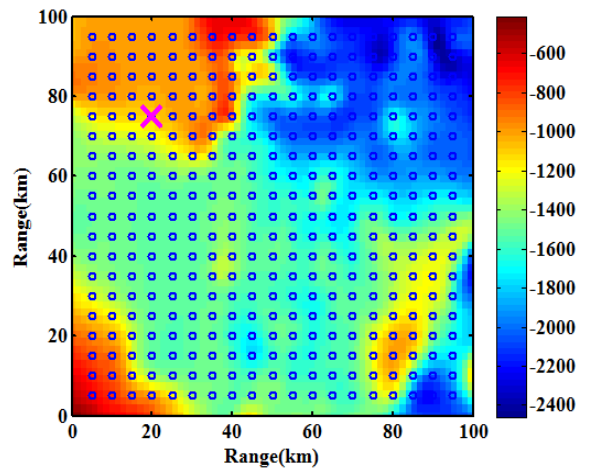


Fig. 2. Locations for calculating TL in search space

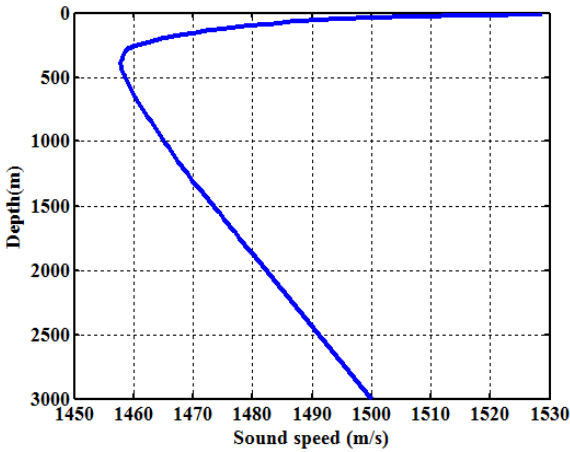


Fig. 3. Sound speed profile

나. 판배열소나(표적소나)의 탐지확률 계산

1) 빔패턴 계산

판배열 소나의 제원은 Fig. 4와 같이 가로 10m, 세로 2m로 가정하였고, 수치적분법^[19]을 이용한 빔패턴 계산을 위해 점음원을 가로 42개, 세로 5개 배열로 구성하였다.

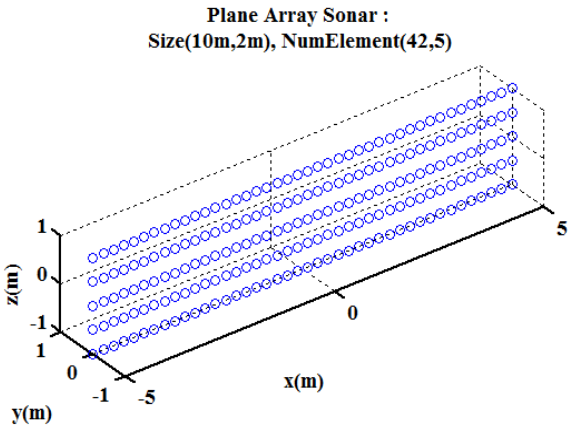
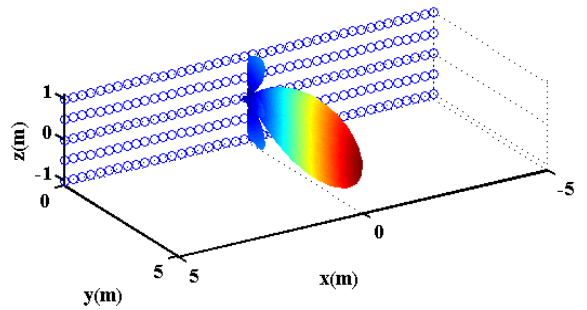
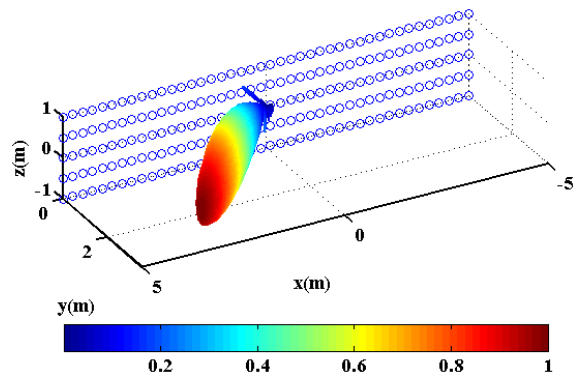


Fig. 4. Plane array configuration

Fig. 5는 수치적분법으로 판배열소나의 빔패턴 계산 및 빔조향 기법을 적용한 결과이며, θ 는 판배열의 수평각, ϕ 는 수직각을 나타낸다. 본 논문에서는 표적 및 자함이 동일 수심인 100m에서 기동하기 때문에 수평각 방향으로만 빔조향을 수행하였으며, 빔조향 각도는 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 이다. Fig. 5에서 colorbar는 정규화(normalization)된 빔패턴 값을 나타낸다.



(a) Beam steering angle : $\theta = 0^{\circ}$, $\phi = 0^{\circ}$



(b) Beam steering angle : $\theta = 45^{\circ}$, $\phi = 0^{\circ}$

Fig. 5. Beam pattern and beam steering for plane array

2) FOM 계산

판배열 소나의 제원을 이용하여 FOM을 도출하기 위해, 음원준위(SL)는 2차 세계대전 당시 측정된 잠수함 프로펠러 방사소음레벨 110dB로 설정하였으며^[18], 소음준위(NL)는 Wentz곡선에서 풍속 2.5m/s, 1kHz에서의 값 55dB로 가정하였다^[18]. 지향지수(DI)는 Fig. 5에서와 같이 수평각(θ)에 대한 빔조향 결과로부터 도출하였으며 Fig. 6과 같다.

탐지문턱(DT)값 결정을 위해 식 (5)의 Passive Broadband Power Detector^[20]를 적용하였으며, 여기서 d 는 detection index로 운용소나의 설계제원에 의해 탐지확률(P_D) 및 오탐지확률(P_{FA}) 값으로부터 식 (6)과 같이 결정된다. 식 (5)에서 w 는 주파수 대역폭이며, t 는 표적신호 적분시간, L 은 관측자에 의한 시간이력손실(time history loss), OL 은 운영자 피로로 인한 손실, CG 는 컬러전시장비 손실이다. 본 논문에서는 $P_D = 0.5$, $P_{FA} = 10^{-4}$, $w = 1\text{Hz}$, $L = 0$, $OL = 0$, $CG = 0$ 을 적용하여 탐지문턱 값을 계산하였다.

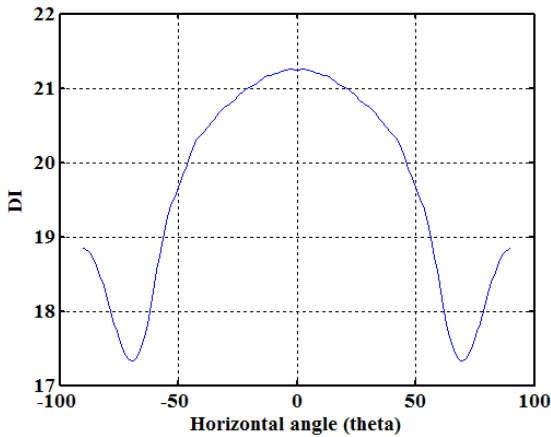


Fig. 6. DL as a function of beam steering for horizontal angle(θ)

$$DT_0 = 5\log_{10}(d) + 5\log_{10}(w) - 5\log_{10}(t) + L + OL - CG \quad (5)$$

$$d = \left(\frac{\log_c(P_{FA})}{\log_c(P_D)} - 1 \right)^2 \quad (6)$$

$$DL = 20\log_{10}\left(\frac{1}{B(\theta, \phi)}\right), \text{ dB} \quad (7)$$

방향손실(DL) 값은 Fig. 5에서 계산한 3차원 빔패턴 ($B(\theta, \phi)$) 값을 적용하여 식 (7)과 같이 계산할 수 있으며, 빔패턴의 주엽방향(look direction)에 대한 나머지 방위의 상대적인 손실 값으로 정의된다^[21]. 본 논문에서는 자함과 표적의 수심이 동일하여 수직각방향(ϕ , 수심방향)으로 변화가 없으므로, 수직각방향(ϕ) DL은 0이며 수평각방향(θ) DL만 고려하였다. Fig. 7은 앞서 계산한 해양환경에 대한 전달손실(TL) 및 방향손실(DL), FOM, 신호초과이득(SE)을 거리/방위에 대해 계산한 결과이다.

Fig. 7의 전달손실은, Fig. 2의 작전영역에서 자함색으로 표기된 위치(X = 20km, Y = 75km, 수심 = 100m)에 소나가 위치했을 경우, 오른쪽 방향을 0°로 하여 반시계방향으로 5° 간격으로 증가시켜 360°까지 총 72개 방위에 대해 거리 20km까지 계산한 결과이며, 방향손실, FOM 및 신호초과이득은 소나기동방위(SnrMovDir)가 90°, 빔조향각이 0°일 경우 결과 값이다. 소나기동방위는 오른쪽 방향 0°를 기준으로 반시계방향으로 360°까지 설정하였으며, 빔조향각 0°는 표적함

의 양측면에 하나씩 위치한 판배열 소나의 broadside 방향인 왼쪽방향과 오른쪽방향을 나타낸다. 전달손실을 20km까지 계산하였으므로 소나위치를 중심으로 20km 반경 내의 결과 값만 유효하다. 신호초과이득은 식 (3)으로부터 도출되며 식 (4)와 같이 신호초과이득의 Log-normal 분포로부터 탐지확률을 계산할 수 있다.

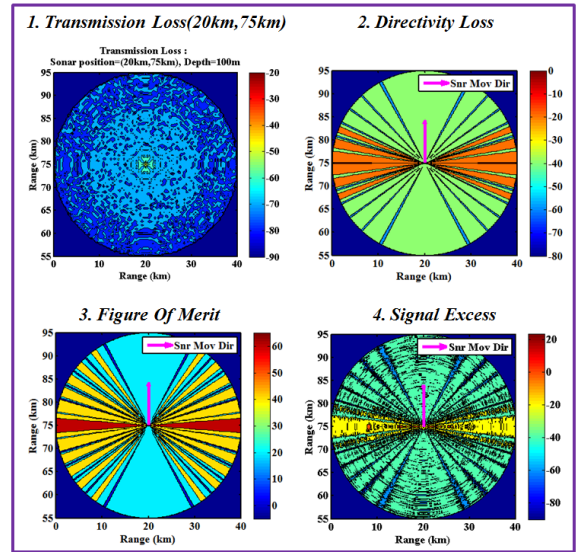


Fig. 7. Contours of TL, DL, FOM, and SE as a function of direction and range

3) 빔조향에 따른 탐지확률

Detection Probability (Beam Steering Angle=0°):
Broadside of array= 0, 180 [degree]
Sonar position=(20km,75km), Depth=100m

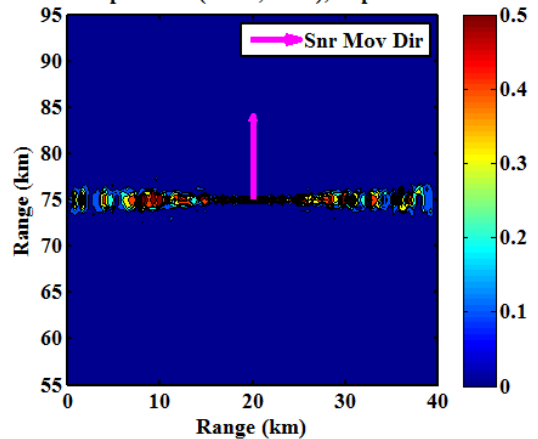


Fig. 8. P_d for 0° beam steering angle($\theta = 0^\circ$)

Fig. 7에서 계산된 신호초과이득으로부터 수평 빔조향각(θ)이 0° 일 때의 탐지확률 분포는 Fig. 8과 같으며, 빔조향각에 따른 탐지확률 값을 계산한 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 표적함의 양 측면에 판배열 소나가 위치해 있으므로, 빔조향 시 broadside 방향이 0° 방향이며, 빔조향 각도는 -90° (아래방향)~ $+90^\circ$ (위쪽방향)이다. 탐지확률 값의 범위는 0~1이지만, 효과적인 결과확인을 위해서 colorbar 레벨을 0~0.5로 조절하여 도식화하였다.

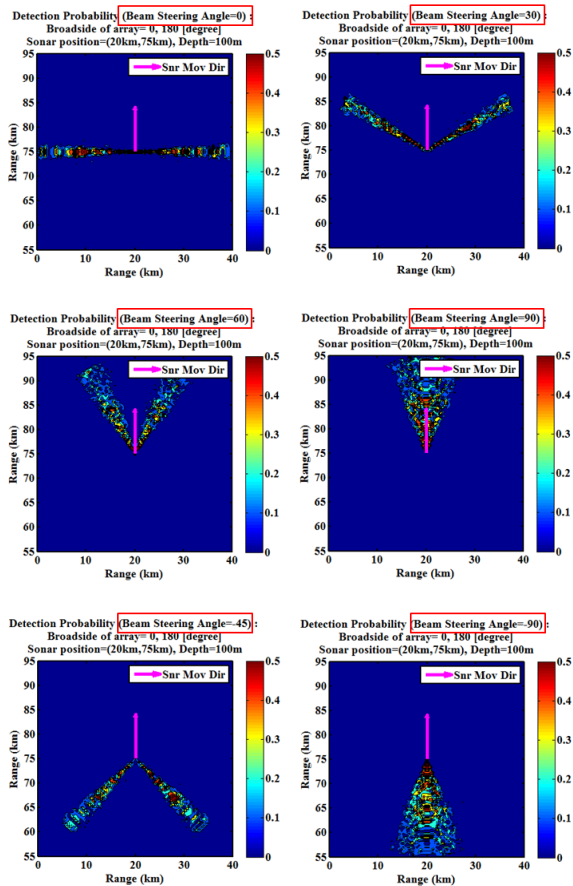


Fig. 9. P_d as a function of beam steering angle

4) 소나기동방위에 따른 탐지확률

본 논문에서는 소나기동방위에 따른 소나의 자세각을 고려하기 위해서 소나기동방위가 주어진 경우, 전방위표적에 대해 빔조향을 실시하여 탐지확률을 계산하였으며 Fig. 10과 같다.

Fig. 10은 소나기동방위(SnrMovDir)가 90° 일 경우

Fig. 9의 전방위 표적에 대한 빔조향 결과에서 주엽 방향(look direction)의 결과를 동일 그림에 표현한 것이며, 이는 소나가 위치한 지점(20km, 75km, 100m)에서 20km 반경 내에 위치한 모든 표적에 대해 빔조향을 적용한 탐지확률 값이다. 빔조향 결과 값 중 주엽 방향(look direction)만 고려하였기 때문에 방향손실(DL)은 없으므로, 탐지확률 값을 Fig. 6의 지향지수(DI) 및 전달손실(TL)에 의해 영향을 받게 된다. 그 결과 Fig. 10에서 소나기동방위가 90° 일 경우, 양 측면에 위치한 판배열 소나의 broadside 방향이 endfire 방향보다 탐지확률이 상대적으로 높음을 확인할 수 있다.

Detection Probability of Steered Plane Array :
SnrMovDir=90, Broadside=180, 0
Sonar position=(20km,75km,100m)

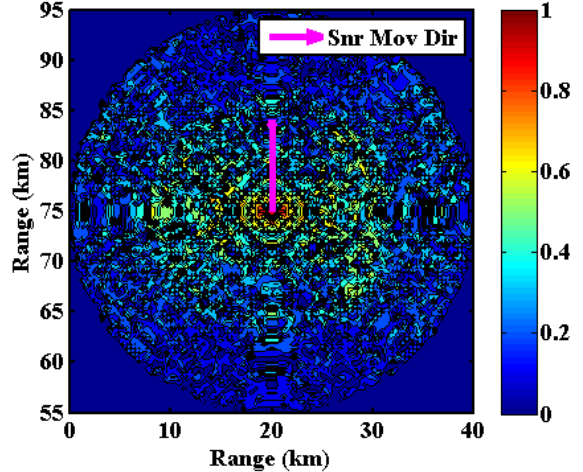


Fig. 10. P_d against the omnidirectional targets for 90° sonar movement direction

Fig. 11은 소나기동방위에 따른 탐지확률 분포이며, 소나기동방위에 의해 소나자세각이 변화될 경우 동일 표적위치에 대한 탐지확률 값의 변화를 확인할 수 있다. 동일한 조건인 Fig. 10의 소나기동방위 90° 일 때의 탐지확률 결과 값과 Fig. 11의 좌측 중앙의 결과가 다른 이유는 결과 경향확인이 용이하도록 그림 격자 사이즈를 (101×101) 에서 (21×21) 로 줄여서 표현했기 때문이며, 실제 탐지확률 값은 두 그림 모두 동일하다. Fig. 11에서 확인할 수 있듯이, 기동방위에 따른 소나의 broadside 방향이 endfire 방향에 비해 탐지확률 값이 상대적으로 높음을 확인할 수 있다.

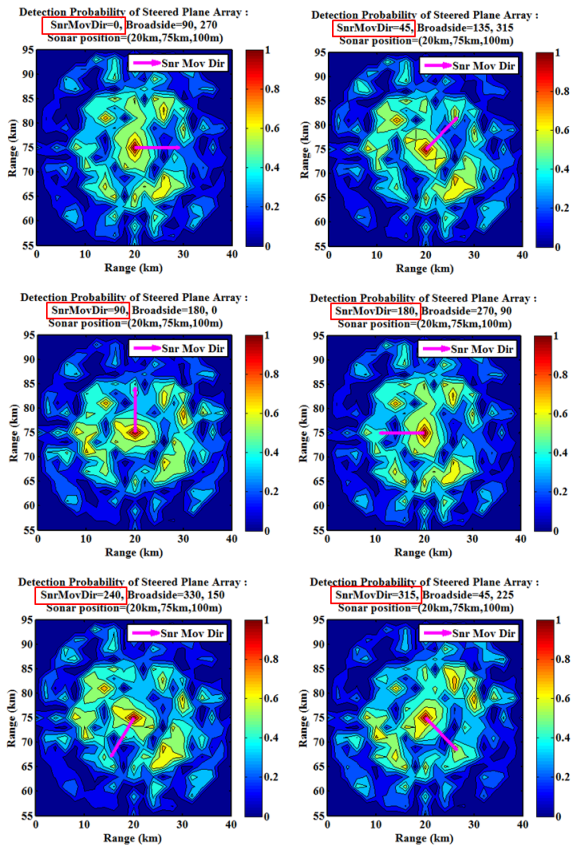


Fig. 11. P_d as a function of sonar movement direction

소나기동방위가 90°일 경우 작전해역 전체의 탐지 확률 및 탐지거리 분포도를 계산한 결과는 Fig. 12~13 과 같다. 작전해역에서 전달손실을 계산한 위치인 Fig. 2의 푸른색 원으로 표기된 모든 지점에서 거리 20km 내에 있는 모든 방위의 표적에 대해 탐지확률을 계산하여 Fig. 12에 나타내었으며, 계산한 탐지확률 결과 값을 거리에 대해 적분하여 Fig. 13과 같이 소나 성능을 탐지거리로 표현하였다. Fig. 13의 탐지거리 분포도에서 작전해역 좌측상단 부분의 소나 탐지성능이 다른 영역에 비해 상대적으로 높은 이유는 Fig. 1과 Fig. 2의 작전해역 수심정보에서 확인할 수 있듯이 다른 해역에 비해 수심이 낮아서 해양의 도파관(waveguide) 효과증가로 인해 음파의 기하학적 확산손실이 감소했기 때문이다 판단된다.

Fig. 14~15는 Fig. 12~13의 붉은색 사각형 지점을 확대한 그림이며, 동일 소나기동방위(90°) 및 소나위치(20km, 75km, 100m)에 대해 앞서 기술한 Fig. 11의 좌

**PD Distribution in Operating Area :
SnrMovDir=90, Broadside=180, 0
Radius of the PD Circles=20[km]**

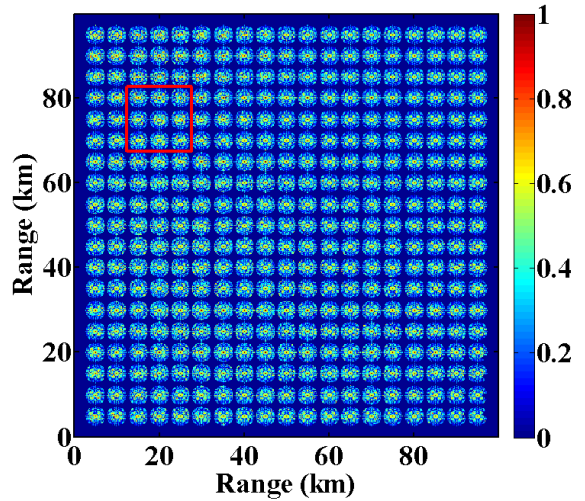


Fig. 12. P_d distribution for the plane array in search space

**DR Distribution in Operating Area :
Depth=100[m], SnrMovDir=90, Broadside=180, 0**

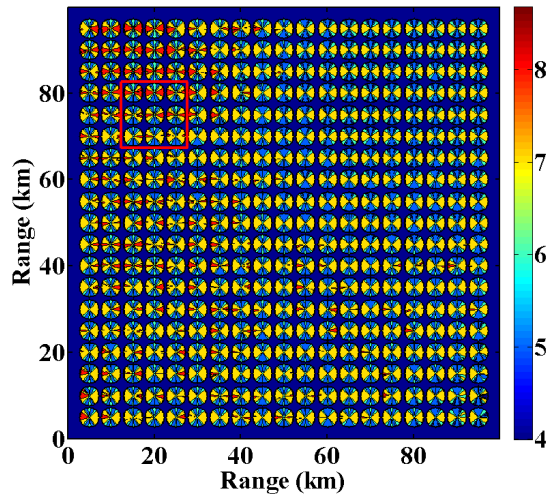


Fig. 13. Detection radius distribution for the plane array in search space

측 중양결과와 Fig. 14의 정중앙에 위치한 탐지확률 분포 값이 일치함을 확인할 수 있다. 즉, Fig. 12~15의 원모양의 탐지확률 및 탐지거리 분포의 의미는 소나가 원의 중심에 위치했을 경우, 20km 반경 내의 모

든 거리·방위에 존재하는 표적에 대한 탐지확률 분포 및 전방위 표적에 대한 탐지거리를 축소하여 표현한 결과 값이며, Fig. 12~15의 Range로 표기된 x축, y축은 소나가 위치한 지점을 나타낸다. Fig. 15에서 탐지거리 값이 방위가 아닌 거리에 대해 변화가 발생하는 이유는 시뮬레이션을 수행한 matlab의 내장 그래픽 함수인 contourf의 특성에 기인한 것이며, 실제 탐지거리 계산 결과 값은 방위만의 함수이며 거리에 대해서는 단일 값이다. 본 논문에서는 전체적인 경향과약이 유용하다 판단하여 contourf 함수를 이용하였다. Fig. 16~21은 소나 기동방위에 따른 작전해역의 탐지확률 및 탐지거리 분포를 계산하여 Fig. 12~13의 붉은색 사각형 지점만 도식화한 결과이다.

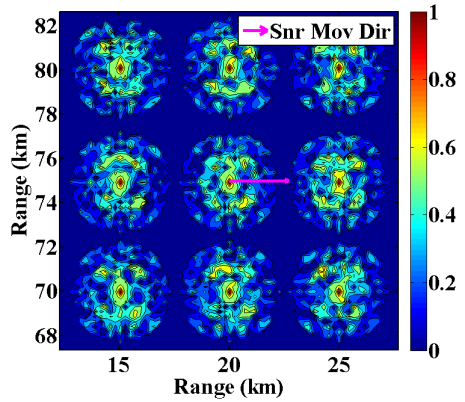


Fig. 16. P_d distribution for 0° sonar movement direction

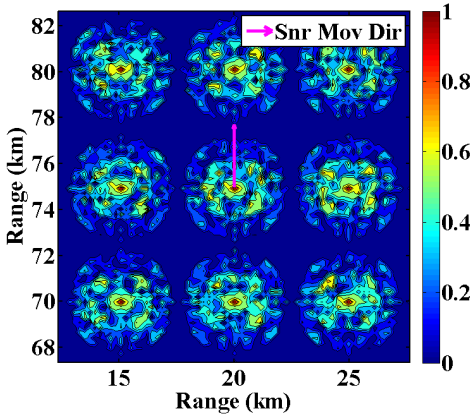


Fig. 14. P_d distribution for 90° sonar movement direction

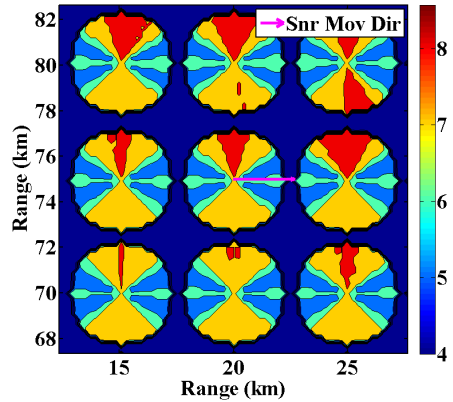


Fig. 17. Detection radius distribution for 0° sonar movement direction

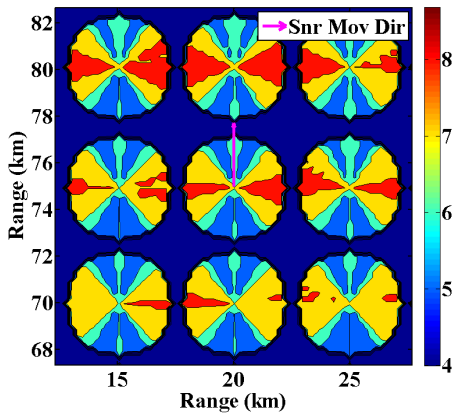


Fig. 15. Detection radius distribution for 90° sonar movement direction

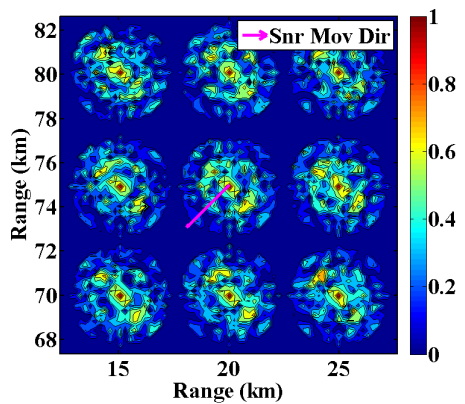


Fig. 18. P_d distribution for 225° sonar movement direction

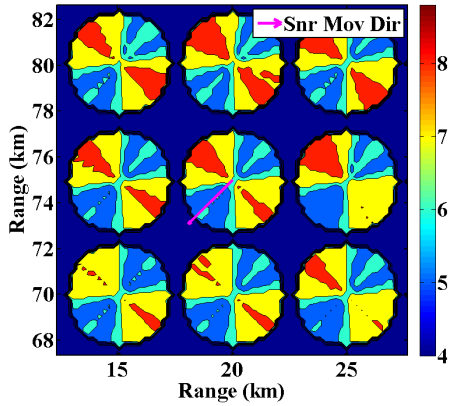


Fig. 19. Detection radius distribution for 225° sonar movement direction

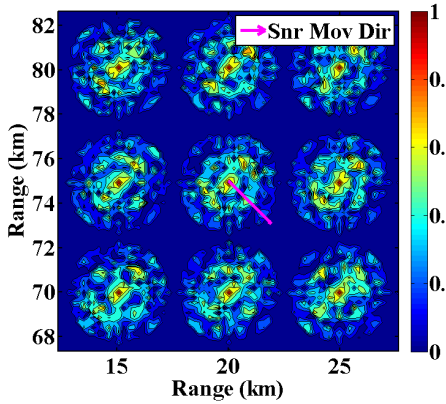


Fig. 20. P_d distribution for 315° sonar movement direction

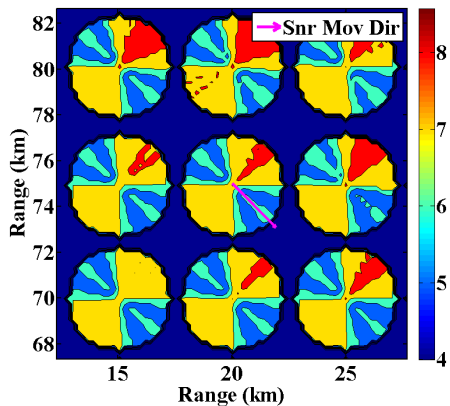


Fig. 21. Detection radius distribution for 315° sonar movement direction

다. 선배열소나(자함소나)의 탐지확률 계산

1) 빔패턴 계산

선배열 소나의 제원은 Fig. 22와 같이 길이 105m로 가정하였고, 수치적분법^[19]을 이용한 빔패턴 계산을 위해 점음원을 길이 방향으로 141개 배치하였다. 본 논문에서 선배열 소나는 자함이 표적탐지를 위해 운용하는 소나이다.

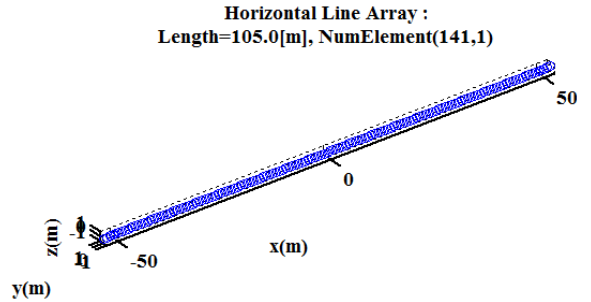
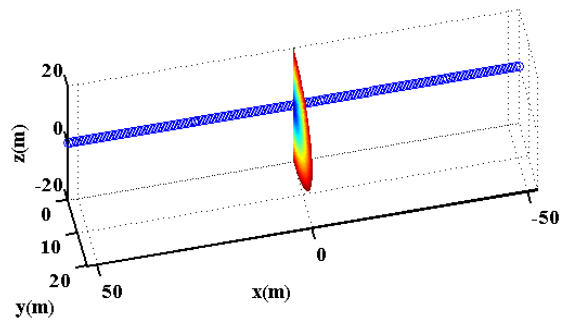
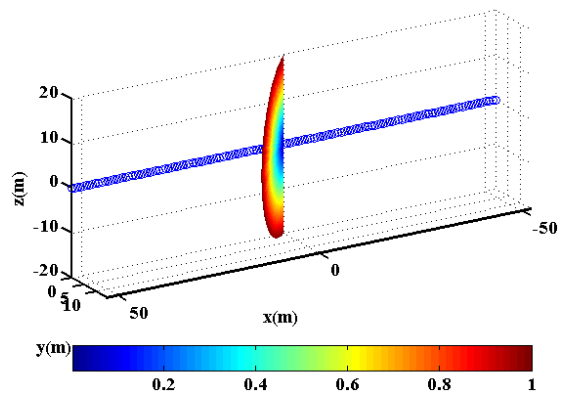


Fig. 22. Line array configuration



(a) Beam steering angle : $\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$



(b) Beam steering angle : $\theta = 45^\circ$, $\phi = 0^\circ$

Fig. 23. Beam pattern and beam steering for line array

선배열 소나의 빔패턴 계산 및 빔조향을 적용한 결과는 Fig. 23과 같으며, 표적이 운용하는 판배열 소나와 동일하게 수평각(θ) 방향으로만 빔 조향을 실시하였으며 빔조향 각도는 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 이다.

2) FOM 계산

전달손실 및 FOM 계산을 위한 소나방정식 파라미터는 앞서 기술한 판배열 소나와 동일하며, Fig. 24는 선배열 소나형상으로부터 도출한 빔패턴을 이용하여 수평각 빔조향에 따른 지향지수(DI)를 계산한 결과이다.

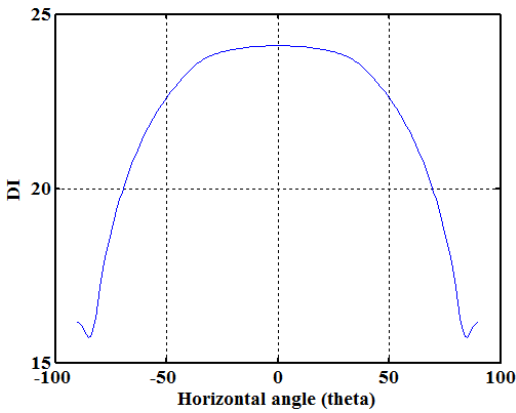


Fig. 24. DI as a function of beam steering for horizontal angle(θ)

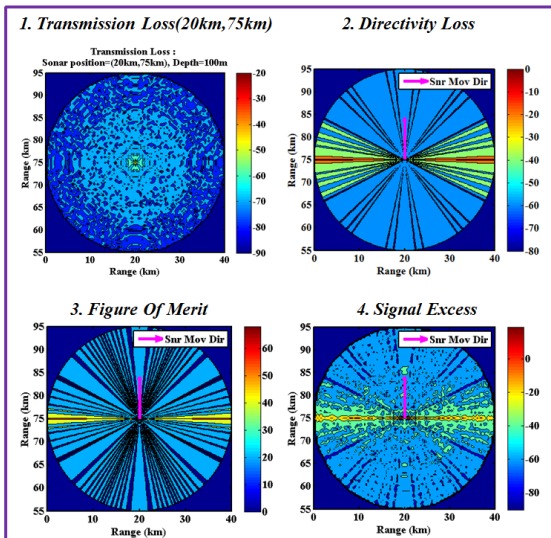


Fig. 25. Contours of TL, DL, FOM, and SE as a function of direction and range

소나기동방위(SnrMovDir)가 90° , 빔조향각이 0° 일 경우, 전달손실(TL), 방향손실(DL), FOM, 신호초과이득(SE) 계산결과를 Fig. 25에 나타내었다. 전달손실은 판배열 소나와 동일하게 Fig. 2의 작전영역에서 자홍색으로 표기된 지점(X = 20km, Y = 75km, 수심 = 100m)에 소나가 위치했을 경우, 72개 방위에 대해 거리 20 km까지 계산한 결과이다.

3) 빔조향에 따른 탐지확률

선배열 소나의 빔조향에 따른 탐지확률을 계산한 결과는 Fig. 26과 같으며, 판배열 소나에 비해 상대적으로 빔폭이 좁아서 표적방위에 대한 에너지 집중도가 높음을 확인할 수 있다.

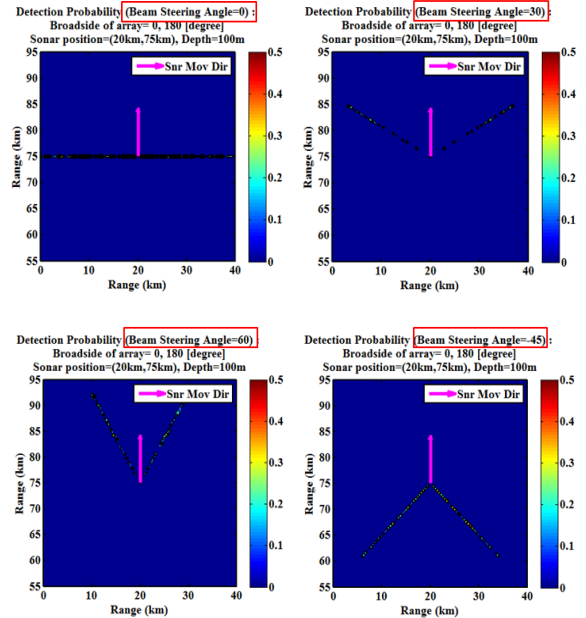


Fig. 26. P_d as a function of beam steering angle

4) 소나기동방위에 따른 탐지확률

선배열소나의 소나기동방위에 따른 탐지확률 분포는 Fig. 27과 같으며, 소나자세각 변화에 따른 동일표적 위치에서의 탐지확률 값 변화를 확인할 수 있다. 선배열소나의 빔폭이 판배열소나 보다 협소하여 빔조향에 따른 에너지 집중도가 높으며, 그 결과 Fig. 11의 판배열소나의 경우 보다 선배열소나가 상대적으로 탐지확률 값이 높음을 Fig. 27을 통해 확인할 수 있다. 판배열소나와 동일하게 소나기동방위(SnrMovDir)가 90°

일 경우 작전해역 전체에 대한 선배열소나의 탐지확률 및 탐지거리 분포도는 Fig. 28~29와 같으며, Fig. 13의 관배열소나 탐지거리 분포도에 비해 선배열소나의 broadside 방향 탐지성능이 대체적으로 우수함을 확인할 수 있다.

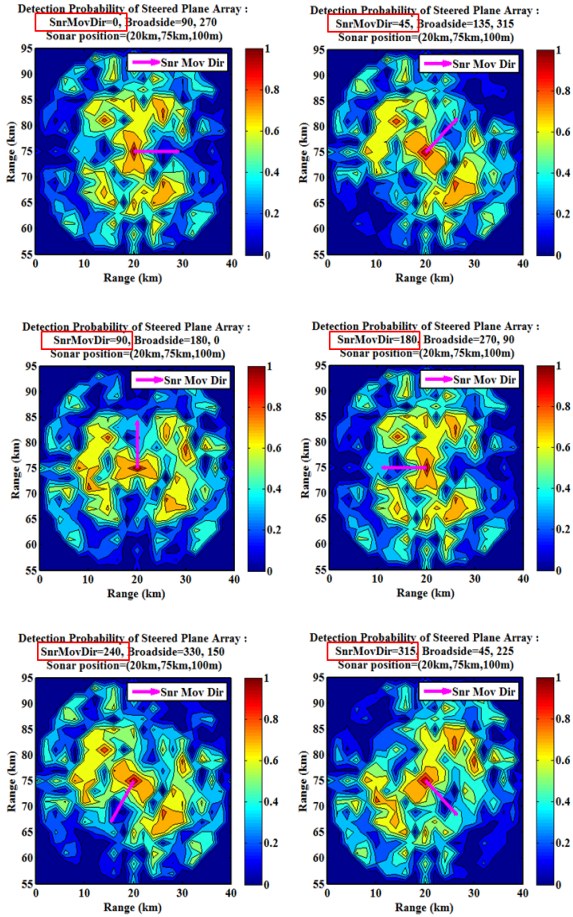


Fig. 27. P_d as a function of sonar movement direction

Fig. 28~29의 붉은색 사각형 지점을 확대하여 Fig. 30~31에 나타내었으며, 소나기동방위가 90°일 경우 소나가 위치한 지점을 중심으로 임의의 표적위치(방위, 거리)에 대한 탐지성능을 확인할 수 있다. Fig. 32~33은 소나기동방위 0°일 경우 작전해역의 임의의 표적에 대한 탐지확률 및 탐지거리 분포를 계산하여 Fig. 28~29의 붉은색 사각형 지점만 도식화 한 결과이다.

본 절에서 계산한 관배열소나(표적소나)와 선배열소

나(자함소나)의 자세각 변화에 따른 탐지확률 계산결과를 이용하여 주어진 기동시나리오에 대한 탐지효율도 분석을 수행하였다.

**PD Distribution in Operating Area :
SnrMovDir=90, Broadside=180, 0
Radius of the PD Circles=20[km]**

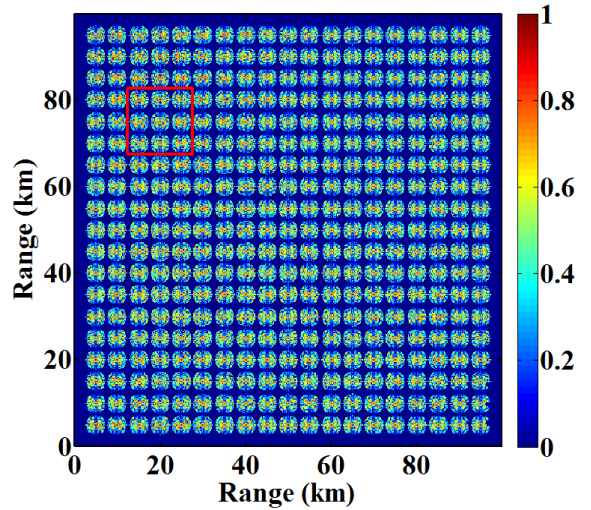


Fig. 28. P_d distribution for the line array in search space

**DR Distribution in Operating Area :
Depth=100[m], SnrMovDir=90, Broadside=180, 0**

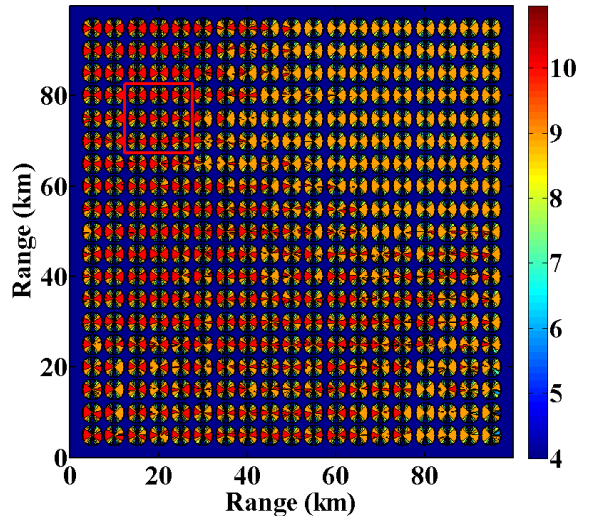


Fig. 29. Detection radius distribution for the line array in search space

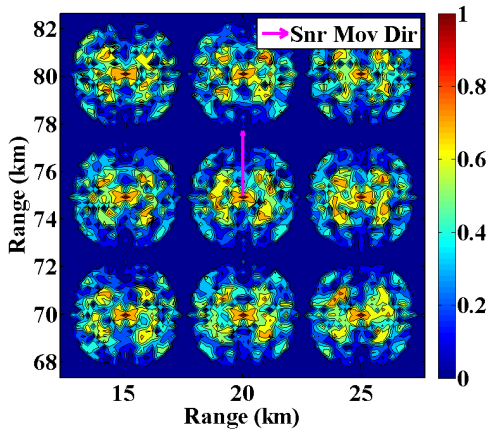


Fig. 30. P_d distribution for 90° sonar movement direction

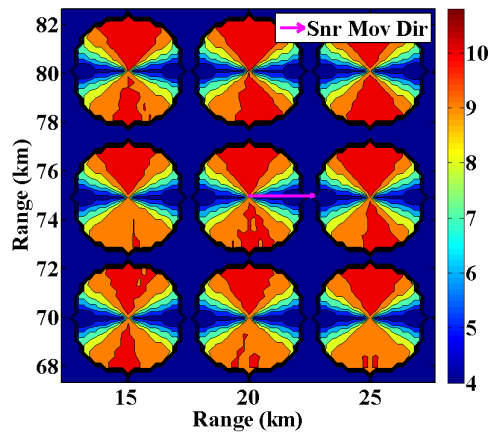


Fig. 33. Detection radius distribution for 0° sonar movement direction

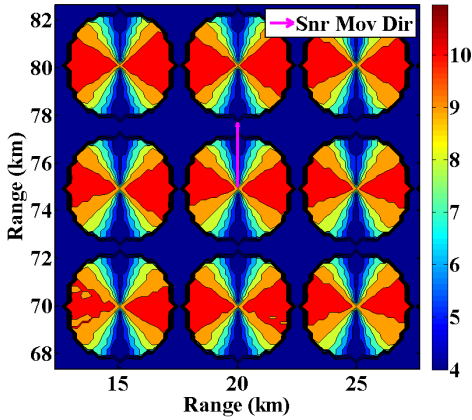


Fig. 31. Detection radius distribution for 90° sonar movement direction

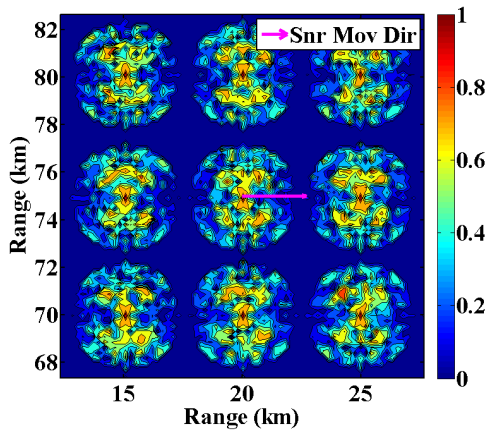


Fig. 32. P_d distribution for 0° sonar movement direction

5. 기동 시나리오 정의

4장에서 계산한 판별소나(표적소나)와 선배열소나(자함소나)를 적용하여 효과도 분석을 수행하기 위해, 표적 및 자함의 기동시나리오를 정의하였다. 표적의 기동시나리오는 Fig. 34와 같으며, 기동시작지점(90km, 10km)에서 종료지점까지 시속 8km/hour의 속도로 18 시간동안 동해의 천해방향으로 침투작전을 수행한다고 가정하였다.

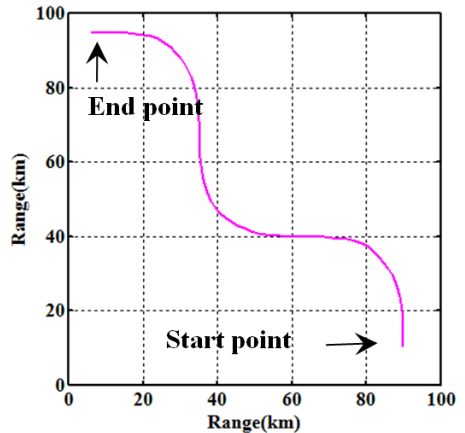


Fig. 34. target track

주어진 표적기동경로에 대해 두 개의 자함기동 시나리오를 Fig. 35와 같이 정의하였다. 두 개의 시나리

오에서 확인할 수 있듯이 표적의 기동경로는 동일하며 자함의 기동경로만 다르다. Fig. 35의 검은색 선으로 표기된 두 개의 자함 기동경로는 3장에서 언급한 OASPP 알고리즘을 이용하여 생성하였다. Fig. 35(a)는 OASPP 알고리즘에 유전알고리즘의 다중목적함수를 적용하여 탐지 및 피탐지성능을 동시에 고려한 최적 탐색패턴이며, Fig. 35(b)는 표적에 대한 탐지성능만을 고려한 결과이다. 시뮬레이션에서 자함의 기동속도는 시속 10km/hour이며 표적을 탐지하기 위해 작전해역을 총 18시간동안 기동한다.

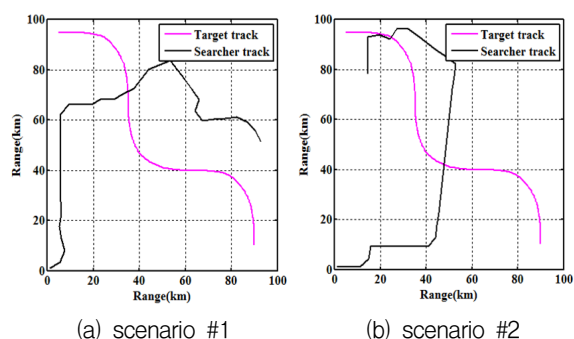
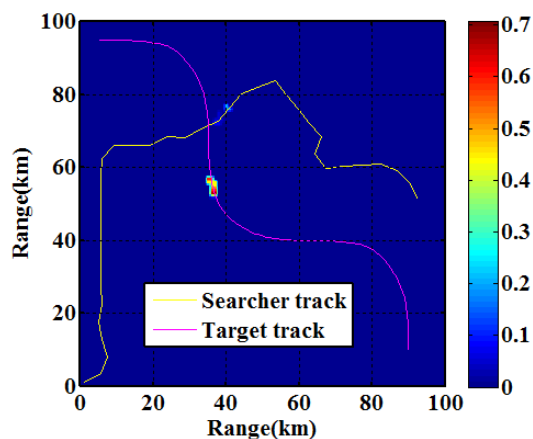


Fig. 35. Scenario #1 and #2 for searcher against the target track

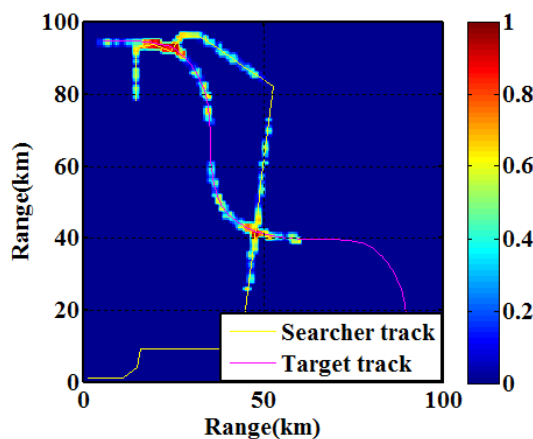
6. 탐지효과도 분석

Fig. 35에서 정의된 두 개의 시나리오와 4장에서 계산한 판배열소나(표적소나) 및 선배열소나(자함소나)의 소나기동방위에 따른 탐지확률을 적용하여 탐지효과도, 취약성(피탐지효과도) 및 취약성을 고려한 탐지효과도 분석을 수행하였다.

자함과 표적은 전달손실 계산거리인 20km 반경 내에 상대세력이 위치할 경우, 소나자세각에 따른 거리 및 방위에 대한 탐지확률을 이용하여 상대세력에 대한 탐지를 0.1시간(6분)간격으로 수행한다. 탐지효과도 분석을 위해서, 기동시간대별 상대세력에 대한 소나접촉정보인 탐지확률을 Fig. 36과 같이 도식화하였다. Fig. 36에서 colorbar는 탐지확률 값이며 자함이 표적을 탐지한 경우, 탐지한 정도를 표적경로 위에 탐지확률로 표기하였고, 반대로 자함이 표적에게 피탐지 되는 경우 자함경로 위에 피탐지확률(counter-detection probability, counter- P_d)로 나타내었다.



(a) scenario #1



(b) scenario #2

Fig. 36. P_d and counter- P_d for the searcher and target tracks

Fig. 36(a)의 시나리오 #1의 경우 자함이 표적소나(판배열소나)의 탐지성능이 저조한 endfire 방향으로 기동하여 자함소나(선배열소나)의 탐지성능이 우수한 broadside 방향으로 7번(접촉시간 36분) 표적을 탐지하고 표적소나의 broadside 방향에 위치하기 직전에 탐지거리(20km) 밖으로 회피하였다. 시나리오 #2의 경우는 OASPP의 목적함수에 피탐지를 고려하지 않고 표적에 대한 탐지성능만을 고려하여 생성된 탐색패턴이기 때문에 자함의 기동경로가 표적경로에 근접하여 형성되었으며, 이로 인해 탐지성능 및 표적과의 접촉시간이 시나리오 #1에 비해 우수하지만 표적에 의해 피탐지(취약성)될 위험성도 상대적으로 증가함을 확인

할 수 있다.

2장에서 정의하였듯이 소나기동경로에 대한 탐지효과도는 시간에 따른 각각의 탐지확률로부터 누적탐지확률을 계산함으로써 가능하며, Fig. 36의 기동시간대별 탐지확률과 피탐지확률을 이용하여 탐지효과도 분석을 수행하였다.

가. 탐지효과도 분석

본 절에서는 표적에 의한 피탐지를 고려하지 않은 탐지효과도 분석을 수행하였다. Fig. 37에서 colorbar는 Fig. 36의 기동시간대별 탐지확률로부터 누적탐지확률을 계산한 결과이며, 두 시나리오 모두 표적이 자함의 탐지거리인 20km 안에 위치한 시점부터 누적탐지확률이 증가한다. 시나리오 #1의 경우 Fig. 37(a)의 상단 (SHR)에서 확인할 수 있듯이 누적탐지확률 0.92(92%)로 표적을 탐지하며, 시나리오 #2의 경우 표적과의 접촉시간이 시나리오 #1에 비해 상대적으로 길기 때문에 1.00(100%)로 표적을 탐지한다. 즉, 주어진 표적이동경로에 대해 시나리오 #1과 시나리오 #2의 자함기동패턴을 따라서 피탐지 위험성을 고려하지 않고 표적에 대한 탐지를 수행할 경우, 두 시나리오 모두 원활한 임무수행이 가능함을 예측할 수 있다.

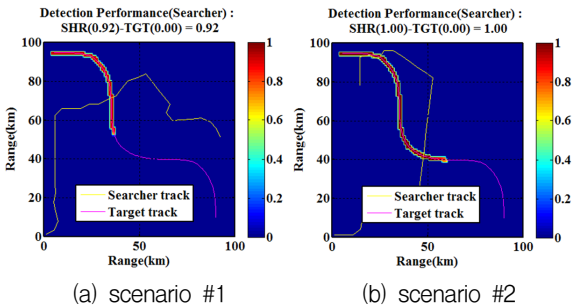


Fig. 37. Measure of Effectiveness analysis for detection

나. 취약성 분석

본 절에서는 표적이 자함을 탐지하는 피탐지(counter-detection) 위험성인 취약성 분석을 수행하였다. Fig. 38은 시나리오에 따른 취약성 분석 결과이며, 자함기동경로 위의 누적탐지확률(colorbar) 값은 표적이 자함을 탐지한 피탐지효과도이다. 시나리오 #1은 앞서 Fig. 36에서 기술하였듯이 자함소나가 탐지가 용이한 위치 및 소나자세각으로 표적에 대한 탐지를 수행한 후, 표적소나의 탐지성능이 우수한 broadside 방향에 위치하

기 전에 탐지가가능거리(20km) 밖으로 회피하였기 때문에 피탐지효과도(Fig. 38(a) 상단의 TGT)는 -0.27로 시나리오 #2의 -1(Fig. 38(b) 상단의 TGT)값에 비해 상대적으로 작음을 확인할 수 있다. 즉, 시나리오 #2의 경우가 시나리오 #1에 비해 피탐지 위험성 증가로 인해 탐지임무를 수행하는데 취약함을 예측할 수 있다.

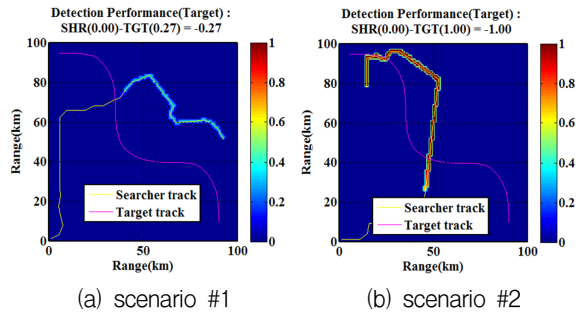


Fig. 38. Vulnerability(counter-detection) analysis

다. 취약성을 고려한 탐지효과도 분석

Fig. 37의 탐지효과도와 Fig. 38의 취약성분석 결과를 통합하여 피탐지 위험성을 고려한 탐지효과도 분석을 수행하였으며 Fig. 39와 같다. 자함과 표적의 거리가 20km 이내일 경우 판매열소나(표적소나) 및 선배열소나(자함소나)의 탐지확률 값을 이용하여 상대세력에 대한 탐지를 수행하며, 이를 통해 취약성을 고려한 탐지효과도를 분석하였다.

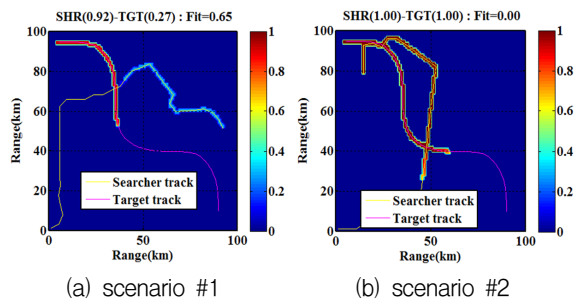
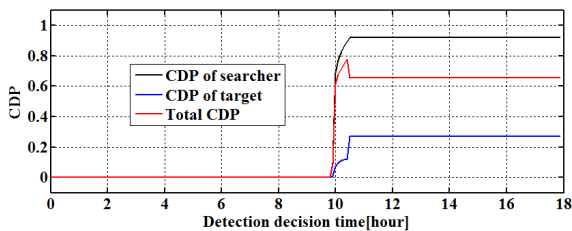


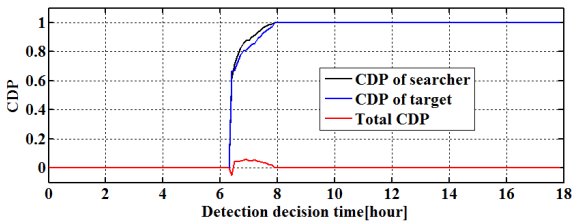
Fig. 39. Measure of Effectiveness analysis for detection considering both detection and counter-detection

Fig. 39(a)의 상단에서 시나리오 #1은 탐지효과도 (SHR) 0.92, 피탐지효과도(TGT) 0.27로 피탐지를 고려한 탐지효과도가 $0.92 - 0.27 = 0.65$ 이며, 시나리오 #2는 Fig. 39(b)에서 탐지효과도(SHR) 1, 피탐지효과도(TGT)

1이며 피탐지를 고려한 탐지효과도는 $1-1 = 0$ 이다. 기동시간대별 탐지효과도 분석 결과는 Fig. 40과 같으며, 탐지효과도(CDP of searcher), 취약성분석(CDP of target) 및 피탐지를 고려한 탐지효과도(Total CDP) 분석결과를 누적탐지확률(CDP)로 도식화하였다. 즉, 동일표적 기동 시나리오에서 두 개의 자함기동전술에 대해 취약성을 고려한 탐지효과도 분석을 수행한 결과, 시나리오 #1의 자함기동패턴이 시나리오 #2의 자함기동패턴보다 표적을 탐지하는데 있어 효율적임을 확인할 수 있다.



(a) scenario #1



(b) scenario #2

Fig. 40. CDP as a function of scenario

7. 결론

본 논문에서는 작전해역의 해양환경정보를 바탕으로 획득한 수동소나의 음향정보와 자함의 기동시나리오가 주어진 경우, 취약성을 고려한 탐지효과도 분석을 수행하였다.

탐지확률 계산을 위해서 자함 및 표적의 기동경로에 의해 영향을 받는 소나자세각을 고려하였으며, 판매열소나와 선배열소나의 제원을 이용하여 빔패턴 계산 및 표적방위에 대한 빔조향기법을 적용하였다. 개발된 OASPP 알고리즘으로 동일 표적기동경로에 대해 두 가지 자함기동 시나리오를 생성하여 효과도 분석에 활용하였으며, 기동시간대별 표적접촉정보인 탐지

확률로부터 누적탐지확률을 계산하여 자함기동경로에 대한 탐지효과도, 취약성 및 취약성을 고려한 탐지효과도 분석을 수행하였다. 주어진 소나로 탐지성능을 도출하여 탐지효과도를 분석한 결과 시나리오 #1의 경우 취약성을 고려한 탐지효과도가 0.65로 시나리오 #2의 결과인 0에 비해서 운용소나의 성능을 극대화할 수 있는 효율적인 소나기동경로 임을 확인할 수 있었다.

본 논문을 통해 해양환경 및 기동시나리오가 주어진 경우, 수동소나시스템의 작전해역에 대한 탐지성능 분석과 기동전술의 효과 예측이 가능하며 효율적인 소나운용전략에 도움이 되리라 판단된다.

후 기

본 연구는 방위산업청 및 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.(계약번호 UD090026DD)

References

- [1] M. W. Zynwalt, A. J. Korsakm, and R. S. Ratner, Appendix A Standard Antisubmarine Warfare Measures of Effectiveness and Measures of Performance, PEO (MUW) INST 3370.1, 2000.
- [2] D. R. DelBalzo, K. P. Hemsteter, and D. P. Kierstead, "Improving ASW with GRASP Multi-Sensor Search Optimization", in Proceedings of the 6th Conference Undersea Defense Technology Conference, 2001. 10.
- [3] D. R. DelBalzo, K. P. Hemsteter, M. D. Wagstaff, E. R. Rike, and J. H. Leclere, "Environmental Effects on MCM Tactics Planning", MTS/IEEE Conference on Ocean, Vol. 3, pp. 1394~1399. 2002.
- [4] D. R. DelBalzo and K. P. Hemsteter, "GRASP Multi-sensor Search Tactics against Evading Targets", Proceedings of the 2002 MTS/IEEE Conference on Oceans, pp. 29~31, 2002.
- [5] K. P. Hemsteter and D. R. DelBalzo, "Acoustic Benchmark Validation of GRASP ASW Search Plans", MTS/IEEE Conference on Ocean, Vol. 1, pp. 60~64, 2002.

- [6] D. P. Kierstead and D. R. DelBalzo, "A Genetic Algorithm Applied to Planning Search Paths in Complicated Environments", *Military Operations Research*, Vol. 8, No. 2, pp. 45~59, 2003.
- [7] Jung-Hong Cho, Jea Soo Kim, Jun-Seok Lim, Seongil Kim, and Young-Sun Kim, "Optimal Acoustic Search Path Planning Based on Genetic Algorithm in Continuous Path System", *OCEANS'2006 IEEE Asia Pacific-Singapore*. pp. 116~117, May 2006.
- [8] Jung Hong Cho, Jea Soo Kim, Jun-Seok Lim, Seongil Kim, and Young-Sun Kim, "Optimal Acoustic Search Path Planning for a Moving Target in Continuous Path", *The 9th Western Pacific Acoustics Conference*, June 26~28, 2006.
- [9] Jung Hong Cho, Jea Soo Kim, Jun-Seok Lim, Seongil Kim, and Young-Sun Kim, "Optimal Acoustic Search Path Planning for Sonar System Based on Genetic Algorithm", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 218~224, September 2007.
- [10] Jung Hong Cho, Jea Soo Kim, Jun-Seok Lim, Seongil Kim, and Young-Sun Kim, "Optimal Acoustic Search Path Planning in Realistic Environments Based on Genetic Algorithm", *Proceedings of OCEANS'08 MTS/IEEE KOBETECHNO-OCEAN'08(OTO'08) Conference*, Kobe, Japan, April 8~11, 2008.
- [11] Jung Hong Cho, JeaSoo Kim, and Seongil Kim, "Benchmarking of Optimal Acoustic Search Path Planning", *Proceedings of the Nineteenth(2009) International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 620~626, Osaka, Japan, June 21~26, 2009.
- [12] Jung-Hong Cho, Mi-Ru Shin, Se-Hyun Oh, J. S. Kim, and Seongil Kim, "Optimal Search Path Planning for Single and Multi Sonar System", *Proceedings of the 10th European Conference on Underwater Acoustics*, Vol. 3, pp. 1202~1208, Istanbul, Turkey, July 5~9, 2010.
- [13] 조정홍, "수중음향 모델링에 기반한 소나체계의 성능분석", *한국해양대학교 공학박사 학위논문*, 2011. 8.
- [14] R. Rattiti and A. Passerini, "Brain-Computer Evolutionary Multiobjective Optimization : A Genetic Algorithm Adapting to the Decision Maker", *Evolutionary Computation*, *IEEE Transactions on*, Vol. 14, No. 5, pp. 671~687, 2010.
- [15] A. Lara, G. Sanchez, C. A. Coello Coello, and O. Schutze, "HCS : A New Local Search Strategy for Memetic Multiobjective Evolutionary Algorithm", *Evolutionary Computation*, *IEEE Transactions on*, Vol. 14, No. 1, pp. 112~132, 2010.
- [16] D. H. Wagner, W. C. Mylander, and T. J. Senders, *Naval Operations Analysis*, Naval Institute Press. 3rd Ed., 1999.
- [17] C. M. Ferla and M. B. Porter, "Receiver Depth Selection for Passive Sonar Systems", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 261~278, 1991.
- [18] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [19] C. A. Balanis, "Uniform Circular and Rectangular Arrays for Adaptive Beamforming Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation*, Vol. 4, pp. 351~354, 2005.
- [20] Ross L. Dawe, "Detection Threshold Modeling Explained", *Defence Science and Technology Organisation(DSTO)*, Australia, 1997.
- [21] J. S. Kim, *Underwater Acoustics and Sonar Engineering*, Korea Maritime Univ., Lecture Note, 2005.