

소나시스템에서의 추적효과도 분석

Measure of Effectiveness Analysis for Tracking in SONAR System

조 정 흥* 김 형 록** 김 성 일** 김 재 수*

Jung-Hong Cho Hyoung Rok Kim Seongil Kim Jea Soo Kim

Abstract

Since the optimized use of sonar systems for target tracking is a practical problem for naval operations, the measure of mission achievability is needed for preparing efficient sonar-maneuver tactic. In order to quantify the mission achievability or Measure Of Effectiveness(MOE) for given sonar-maneuver tactics, we developed and tested a simulation algorithm. The proposed algorithm for tracking is based on Measure Of Performance(MOP) for localization and tracking system of sonar against target. Probability of Detection(PD) using steering beam patterns referenced to the aspect angle of sonar is presented to consider the tracking-performance of sonar. Also, the integrated software package, named as Optimal Acoustic Search Path Planning(OASPP) is used for generating sonar-maneuver patterns and vulnerability analysis for a given scenario. Through simulation of a simple case for which the intuitive solution is known, the proposed algorithm is verified.

Keywords : Tracking, Measure Of Effectiveness(MOE), Localization, Probability of Detection(PD), Detection, Sonar-Maneuver Tactic

1. 서론

해양에서 소나를 이용하여 표적에 대한 추적임무를 수행할 경우, 효율적인 소나운용은 임무성공여부와 직결되며 소나시스템의 성능을 극대화 시킬 수 있는 현실적인 방안이 될 수 있다.

미 해군의 경우 운용소나의 성능 및 기동전술의 효과를 예측하기 위해 효과도(MOE : Measure Of

Effectiveness) 분석 및 성능지표(MOP : Measure Of Performance) 개념을 1972년에 확립하였고^[1], 대잠수함전(ASW : Anti-Submarine Warfare) 임무에 따라 탐지(detection)효과도, 식별(classification)효과도, 위치추정(localization)효과도, 공격(attack)효과도 및 취약성(vulnerability) 분석으로 구분하여^[1], 지속적인 해상훈련을 통해서 작전해역의 환경정보 자료를 측정 및 수집하고 이를 분석하여 운용 장비 및 전술시나리오에 대한 유효성을 정량적으로 평가하고 있다^[2~6]. 또한, 최근 인터넷을 통해서 대잠수함전 임무에 위치추정 결과 별도로 추적(tracking)이 추가되었음을 확인하였고^[7,8], 이는 소나를 이용한 현대전에서 새로이 추가된 추적 임무에 대한 중요성을 시사하고 있다. 국내에서

† 2012년 11월 6일 접수~2013년 1월 11일 게재승인

* 한국해양대학교 해양공학과

** 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 조정홍(hong02020320@naver.com)

는 2005년부터 효과도 분석에 대한 연구를 시작하여 탐지효과도 분석에 대한 연구는 수행한 바 있으나^{9~16)}, 본 논문에서 다루고자하는 추적효과도에 관한 연구는 수행된 바 없으며, 국내·외 학계에 보고된 자료도 없다.

본 논문에서는 실제 소나시스템의 추적성능을 고려한 추적효과도 분석방안을 제시하였으며, 작전해역의 해양환경정보를 바탕으로 획득한 소나의 음향정보와 자함 및 표적의 기동시나리오가 주어진 경우, 시뮬레이션을 통해 계산한 시간대별 소나접촉정보로부터 추적효과도 분석을 수행하였다.

기동시간대별 위치추정 결과의 연속인 추적효과도 분석을 위해서, 위치추정 MOPs의 개념을 정리하였으며, 추적으로 개념확장이 가능한 위치추정 MOP를 선택하여 소나를 이용한 임무만을 고려하는 음향전(acoustic battle)에 적합하도록 재해석하여 추적효과도 분석 방안으로 제시하였다. 또한, 실제 소나시스템에서 표적에 대한 추적을 수행할 경우 추적성능과 직결되는 소나 주엽(main lobe)의 빔폭과 소나와 표적의 상대방위에 따른 소나의 탐지성능을 추적효과도 분석에 반영하였다. 이를 위해, 자함 및 표적의 기동경로에 의해 영향을 받는 소나자세각을 고려하였으며, 판배열(plane array)소나와 선배열(horizontal line array)소나의 제원을 이용하여 3차원 빔패턴(beam pattern) 계산 및 표적방위에 대해 빔조향(beam steering)기법을 적용한 탐지 확률(probability of detection) 값을 추적효과도 분석에 활용하였다. 시뮬레이션에서 주어진 표적기동경로에 대해 현실성 있는 자함기동경로를 생성하여 추적효과도를 분석하기 위해, 해양환경과 탐지세력의 음향정보를 바탕으로 최적의 음향탐색패턴을 도출하는 OASPP (Optimal Acoustic Search Path Planning) 알고리즘⁹⁻¹⁴⁾을 이용하였으며, 표적에 의해 자함이 피추적(counter-tracking)될 위험성인 취약성분석을 동시에 고려하기 위해서 유전알고리즘(genetic algorithm)의 다중목적함수(multi-objective function)^{17,18)}를 추적효과도 분석 알고리즘에 적용하였다.

작전해역의 해양환경정보를 바탕으로 획득한 소나의 음향정보와 자함 및 표적의 기동시나리오가 주어진 경우, 시뮬레이션을 통해 추적효과도 분석 및 취약성 분석을 수행하였으며, 제안한 알고리즘을 검증하였다.

2. 추적효과도 분석 이론

효과도(MOE)¹¹⁾ 분석은 주어진 해양환경조건과 운용 장비 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.

주어진 임무에 대한 MOE를 분석하기 위해서, MOP¹¹⁾의 개념이 필요하며, MOE를 한 번에 분석할 수 없는 복합임무의 경우 임무수행에 관련된 세부시스템의 성능을 MOPs를 이용해서 계산한 뒤, 결과를 통합하여 MOE를 측정할 수 있다. 즉, 단일임무일 경우 하나의 MOP로 MOE 분석이 가능하며, 복합임무의 경우는 임무를 구성하는 세부임무에 대한 MOPs를 측정한 뒤, MOE를 분석해야만 세부임무의 특성이 반영된 효율적인 효과도 분석이 가능하다.



Fig. 1. Considerations of MOE analysis for Tracking

추적효과도는 소나를 운용하는 세력이 표적탐지를 통해서 표적의 경로를 추정할 확률로 정의될 수 있으며, 실제 소나시스템에서 표적에 대한 추적을 수행할 경우 Fig. 1에서와 같이 운용되는 소나 주엽의 빔폭과 소나와 표적의 상대방위가 추적성능에 직결되는 요소이다. 그러므로 추적효과도 분석을 위해서 소나탐지성능 계산에 소나의 형상에 따른 빔패턴 및 표적과 탐지

소나간의 상대방위에 따른 빔조향 기법이 고려되어야 하며, 성공적인 추적을 판단할 수 있는 기준이 되는 효과도 분석 알고리즘을 적용하여 Fig. 1과 같이 융합을 통한 현실성 있는 추적효과도 분석 방안 개발이 필요하다.

추적은 표적의 이동경로를 추정하는 것이므로 탐지를 통한 위치추정 결과의 연속이며^[9], 현재 공개된 자료에는 Table 1과 같이 위치추정효과도 분석을 위한 MOPs는 정의되어 있으나^[1], 추적효과도 분석에 대한 자료는 찾아 볼 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 표 1의 위치추정효과도 분석을 위한 4가지 MOPs^[1]에 대한 개념정립을 통해서 추적효과도 분석 방안을 제시하였다.

Table 1. MOPs for localization

	MOPs
ASW Localization	<ul style="list-style-type: none"> • Probability of successful localization given a valid contact • Time from correct classification to attack criteria • Probability of localization as a function of lateral range • Cumulative localization probability

가. 위치추정 MOPs

1) 유효한 표적접촉정보를 이용한 위치추정확률

위치추정효과도 분석을 위한 첫 번째 MOP는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 표적접촉정보로부터 획득한 위치추정기회에 대한 성공적인 위치추정횟수의 비로 위치추정확률이 정의된다.

앞서 언급한 ASW에서는 주어진 임무의 범위가 탐지, 식별, 위치추정 뿐만 아니라 공격까지 포함이 되므로 유효한 표적접촉정보로부터 표적에 대한 탐지 및 식별이 완료된 경우를 위치추정기회로 정의하며, 위치추정기회 중 무기발사가 가능한 거리에 표적이 위치하는 경우를 성공적인 위치추정이라 정의한 바 있다^[1]. 그러나 본 논문의 경우, 공격을 고려하지 않고 소나를 이용한 표적기동분석 측면만을 고려하였기 때문에, 성공적인 위치추정의 정의를 신호대잡음비(SNR : Signal to Noise Ratio)가 높은 탐지로 인해 표적위치추정이 완료된 경우로 정의하여 적용하였다.

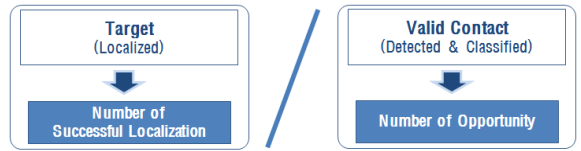


Fig. 2. Localization MOP #1 : probability of localization using Valid contact information

2) 성공적인 위치추정을 위한 소요시간

위치추정확률은 Fig. 3과 같이 성공적인 위치추정까지 소요된 시간으로 정의할 수 있다. 즉, 임의의 표적 탐지를 통해 표적에 대한 정확한 식별이 완료된 시점부터 표적위치추정이 완료된 시간까지의 소요시간을 이용하여 위치추정확률을 계산한다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 표적에 대한 탐지를 수행한 4개의 센서 중, 성공적인 위치추정기준까지의 필요시간이 상대적으로 짧은 좌측의 첫 번째 센서가 가장 높은 위치추정확률을 가지며, 성공적인 위치추정을 위한 소요시간이 증가할수록 위치추정확률은 반비례하여 감소하게 된다.

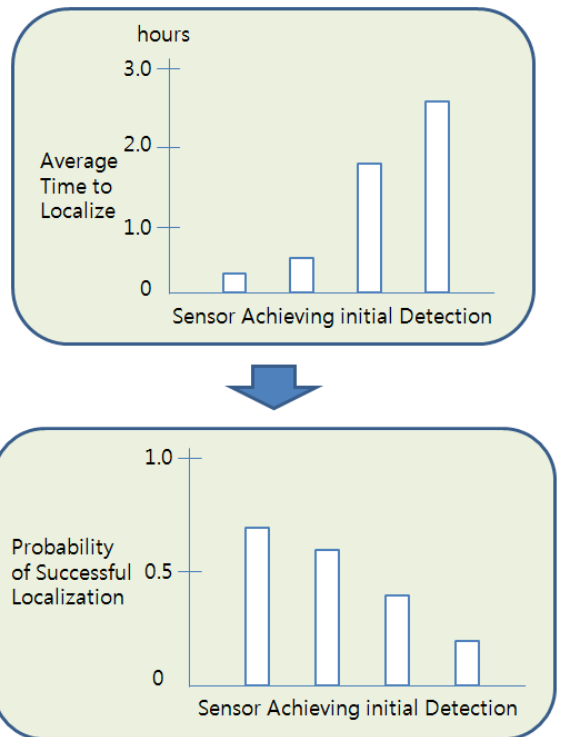
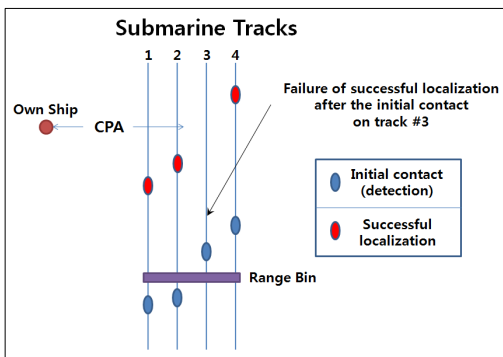


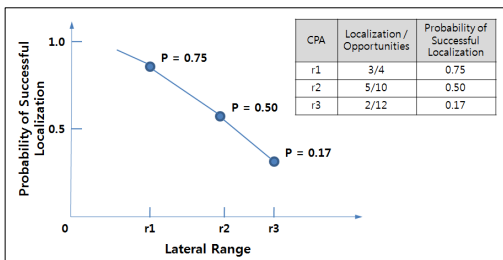
Fig. 3. Localization MOP #2 : probability of localization using time required to localize

3) 거리에 따른 위치추정확률

위치추정세력(own ship)과 표적(submarine)간의 최단거리(CPA : Closest Point of Approach)로 표현되는 임의의 range bin에 대해, 표적경로(submarine tracks)의 개수를 시나리오에 따라 정의하여 각 CPA에서의 표적경로의 개수와 표적접촉 데이터로부터 Fig. 4(a)와 같이 위치추정확률을 계산할 수 있다. Fig. 4(a)에서 range bin안의 총 표적경로의 수는 4개이며, 이중 최초 표적 탐지(initial contact) 후, 성공적인 위치추정을 완료한 경로의 수는 3개이므로 Fig. 4(b)의 r1 range bin에서 위치추정확률이 3/4으로 0.75가 된다. Fig. 4(a)의 세 번째 표적경로는 소나를 이용해서 최초탐지는 가능하였지만, 지속적인 탐지실패 또는 Fig. 2에서 기술한 성공적인 위치추정 기준에 부합하지 못해서 위치추정이 실패한 경우이다. Fig. 4(a)와 같이 거리에 따른 각 range bin에 대해 동일하게 적용하여 계산하면, 거리별 위치추정확률은 Fig. 4(b)와 같이 나타낼 수 있다.



(a) Calculation method of localization probability at a range bin(r1)



(b) localization probability of each range bin as a function of range

Fig. 4. Localization MOP #3 : probability of localization using range bin

4) 거리에 따른 누적위치추정확률

시간대별 탐지확률을 통합함으로써 누적탐지확률을 계산하여 표적에 대한 탐지효과도를 계산하는 방법^[1,11]과 동일하게, 개별 위치추정확률로부터 식 (1)을 이용하여 누적위치추정확률(CLP : Cumulative Localization Probability)을 계산함으로써 위치추정효과도 분석이 가능하다. Table 2는 다가오는 표적에 대해서 Fig. 4에서 도출한 각 range bin에서의 위치추정확률로부터 식 (1)을 이용하여 누적위치추정확률을 계산하는 과정을 나타낸다. 식 (1)에서 p_i 는 위치추정확률, i 는 range index 이다.

$$CLP_n = 1 - \prod_{i=0}^n (1 - p_i) \quad (1)$$

Table 2. Localization MOP #4 : cumulative localization probability

Range Index	Range Bin	Number of Successful Localization	Number of Opportunities	Probability of Successful Localization	Cumulative Localization Probability
1	10-15	2	12	0.17	0.17
2	5-10	5	10	0.50	0.585
3	0-5	3	4	0.75	0.896

나. 추적효과도 분석 방안

본 논문에서는 추적효과도 분석으로 확장하기 용이한 Fig. 2의 위치추정 MOP #1을 소나를 이용한 음향전에 적합하도록 재해석하여 추적효과도 분석에 적용하였다. 즉, Fig. 2의 소나를 이용한 표적접촉정보에서 탐지 및 식별이 완료된 상태로 정의된 위치추정기회는, 소나방정식으로 탐지확률을 계산하는 정형화된 수식^[1,11,15]을 통해 본 논문에도 동일하게 적용하였으며, Fig. 2에서 정의된 성공적인 위치추정 개념은 무기발사 가능거리가 아닌 SNR이 높은 탐지로 인해 표적의 위치(거리, 방위)추정이 가능한 상태로 재해석하여 적용하였다.

반면, 위치추정 MOPs #2~#4의 경우는 시뮬레이션을 통한 추적효과도에 분석에 적용하기 어려운 부분이 있다. Fig. 3의 성공적인 위치추정에 소요된 시간으로 정의되는 MOP #2의 경우는 실제 해상훈련을 통한 각 센서별 표적접촉데이터로부터 분석이 가능한

방법이며, Fig. 4의 MOP #3의 방법 또한, 각 range bin의 크기에 따라 확률 값이 달라질 수 있으며 실제 표적접촉데이터를 이용하여 검증이 필요하므로 시뮬레이션을 통해 구현하기 모호한 측면이 있다. 마지막으로 식 (1)의 MOP #4 방법인 CLP는 거리에 따른 위치추정확률 계산이 선행되어야 하며, Table 2의 CLP계산에서 확인할 수 있듯이 임의의 range bin에서의 높은 위치추정확률 값 하나가 CLP 결과 값을 크게 증가시키므로 전체표적경로를 추정하는 추적효과도에 분석에는 부적합하다고 판단된다.

본 논문에서는 위치추정 MOP 개념과 더불어, 소나의 추적성능에 직접적인 영향을 미치는 요소를 고려한 현실성 있는 추적효과도 분석을 위해서, 소나제원에 따른 빔패턴 계산 및 소나기동방향에 의해 가변적인 소나자세각과 표적의 상대방위에 대해 빔조향 기법을 적용하여 계산한 탐지확률 값을 적용하였다. Fig. 5는 본 논문에서 제안한 추적효과도 분석 모식도이며, 표적경로위의 colorbar 레벨은 각 시점에서 자함이 표적을 탐지한 탐지확률(P_d) 값을 나타낸다. 탐지확률 값이 낮은 Fig. 5의 추적정보 소실구간은 표적이 자함의 탐

지 취약방위에 위치하거나, 표적의 급격한 선회와 속력의 급격한 변화 및 SNR 감소 등으로 인해 위치추정기회는 있었지만, 정확한 위치추정은 불가능한 영역을 의미한다. 임의의 시점에서 표적탐지가 원활하지 않은 경우 표적의 위치추정에도 어려움이 있으므로, Fig. 5에서 유효추적횟수는 전체추적기회에서 추적정보 소실구간을 제외한 나머지 부분으로 정의하였으며, 추적정보 소실구간의 판단기준은 탐지확률 값이 일정 값 이하인 경우로 설정하였다. 5장에서 다룰 추적효과도 분석 시뮬레이션에서 자함에 비해 상대적으로 추적성능이 저조한 표적의 피추적효과도 결과 분석·확인이 용이하도록, 본 논문에서는 탐지확률이 0.1 이상인 값을 유효탐지라 정의하였으며, Fig. 5의 전체추적기회 구간에서 탐지확률이 0.1 보다 낮을 경우 추적정보 소실구간으로 설정하였다. 실제 소나시스템의 경우 탐지기준은 신호초과이득(SE : Signal Excess) 값이며, SE는 신호처리 된 방위별 빔 에너지 정보를 탐지문턱(DT : Detection Threshold)값과 비교하여 계산할 수 있다^[20]. 그러므로 본 논문의 추적효과도 분석방안을 실제 소나시스템에 적용할 경우 유효탐지를 위한 탐지

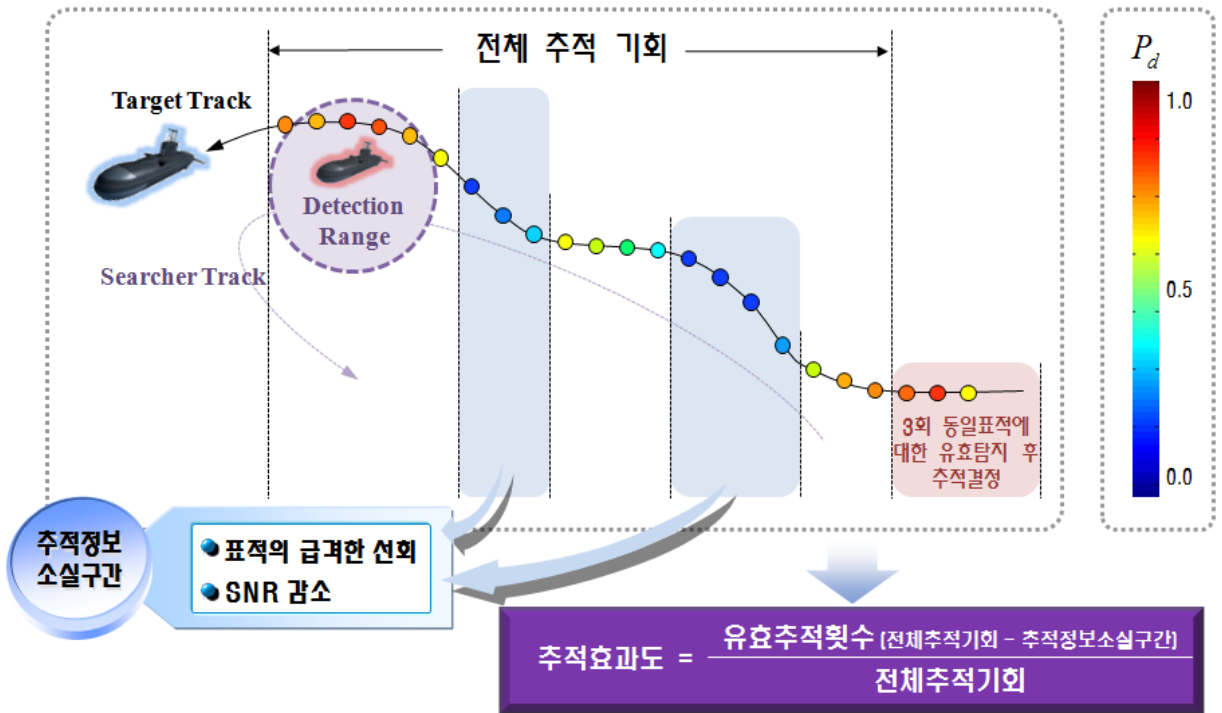


Fig. 5. Schematics of MOE analysis for tracking

확률기준 값은, DT값에 의해 결정되는 SE가 0일 때의 탐지확률 값 0.5가 합리적이라 판단된다. 또한, 운용환경에 따라 표적신호와 잡음신호의 확률적 분포가 일정치 않으므로^[20] 정확한 추적효과도 분석을 위해서 운용지역, 운용시각, 해상환경에 따른 적절한 DT값을 설정할 필요성이 있다.

일반적으로 표적에 대한 추적을 수행하기 위해서는 동일표적에 대한 반복적인 탐지가 선행되어야 하며, 이를 통해 추적할 표적을 결정하게 된다. 레이더(RADAR)시스템에서 표적을 탐지·추적할 경우, 일정횟수의 스캔 또는 프레임에 반복적으로 탐지 되는 표적을 분석·분류과정을 거쳐 자동추적을 위한 표적선정 및 표적트랙초기화 조건으로 사용하며^[21~23], 소나시스템에서도 추적모드 전환을 위한 표적초기화 기준을 DT 값보다 큰 크기의 측정치들을 저장한 후 3프레임 연속으로 방위와 주파수 방향으로 일정 기준 이내에서 탐지가 진행되는 경우로 설정한 사례가 있다^[20]. 본 논문에서도 Fig. 5의 좌측에서 최초 3회 동일 표적에 대한 유효탐지가 선행될 경우, 해당 표적에 대한 추적모드로 전환되도록 설정하였으며, Fig. 5의 전체추적기회는 최초 3회 동일표적에 대한 유효탐지 후 발생하는 모든 탐지시도로 정의하였다.

실제 소나시스템에서 추적과 식별은 거의 동일한 시점에서 이루어지며, 표적에 대한 식별의 경우 표적 접촉데이터로부터 식별알고리즘 및 운용자에 의해 결정되어진다. 본 논문에서는 표적에 대한 정확한 식별이 이루어졌다는 가정 하에 연구를 진행하였다.

3. 소나추적성능을 고려한 탐지확률 계산

본 논문에서는 소나의 추적성능에 직접적인 영향을 미치는 요소인 소나의 제원에 따른 빔패턴 및 표적위치에 따른 빔조향 기법을 적용하여 탐지확률 값을 계산하였으며, 이를 추적효과도 분석에 활용하였다. 주어진 기동시나리오에서 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 결정하기 위한 기준 값, DL 은 빔패턴에 따른 방향손실(Directivity Loss) 값을 의미한다.

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

식 (2)로부터 계산된 FOM을 이용하여 식 (3)과 같이 SE를 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 SE의 Log-normal 분포를 이용하여 식 (4)와 같이 탐지확률(P_d : Probability of Detection)를 도출할 수 있다^[24]. 여기서 σ 는 SE의 표준편차이며, 본 논문에서는 해상실험 값인 8~9dB^[25]중 8dB를 적용하였다.

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

본 논문에서는 시뮬레이션을 위해서 판배열 소나와 선배열 소나에 대해 탐지확률을 계산하였으며, 판배열은 표적이 탐제한 소나, 선배열은 자함이 탐제하고 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 자함과 표적의 상대위치에 따른 각각의 탐지확률 값과, Fig. 5에서 전체추적기회에 대한 유효추적횟수의 비로 정의된 추적효과도 분석방안을 적용하여 주어진 자함 및 표적 기동경로에 대한 추적효과도를 분석하였다.

가. 작전해역정보

자함 및 표적이 기동하는 작전해역은 동해의 울릉도 북서쪽에 위치한 Fig. 6의 가로 100km, 세로 100km 영역이며, 기동수심은 표적과 자함 모두 동일하게 100m로 설정하였다. Fig. 6에서 colorbar는 작전해역의 수심정보를 나타내며, 작전해역에 표기된 파란색 원들은 거리중속 음파전달모델을 이용하여 각 위치에서의 TL을 거리·방위에 대해 계산한 지점을 도식화한 것이다. TL 계산을 위한 수심별 음속분포는 Fig. 7과 같다.

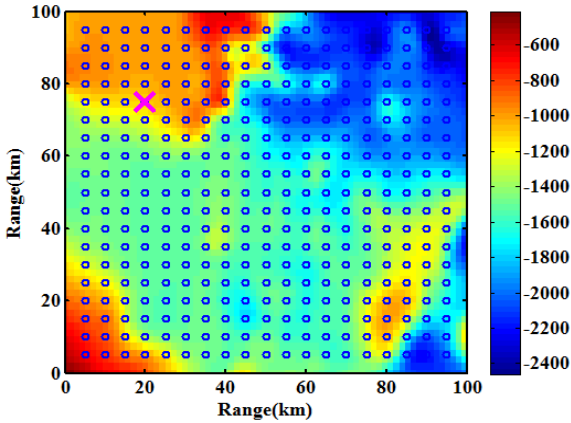


Fig. 6. Geometry of the search area and locations of calculating TL marked with blue circles in search area

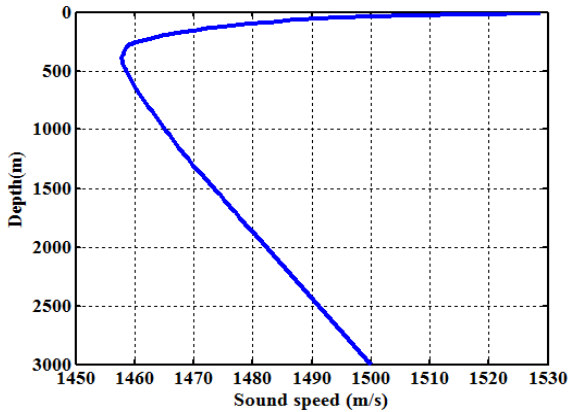


Fig. 7. Sound speed profile

나. 판배열소나(표적소나)의 탐지확률 계산

1) 빔패턴 계산

판배열 소나의 제원은 Fig. 8과 같이 가로 10m, 세로 2m로 가정하였고, 수치적분법^[26]을 이용한 빔패턴 계산을 위해 점음원을 가로 42개, 세로 5개 배열로 구성하였다.

Fig. 9는 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. 9에서 colorbar는 정규화(normalization)된 빔패턴 값을 나타낸다.

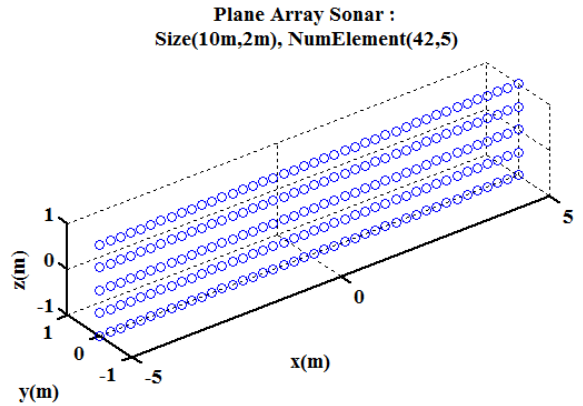
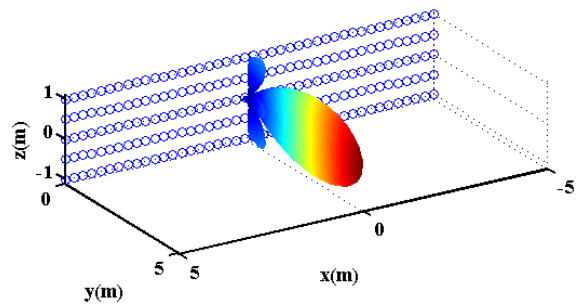
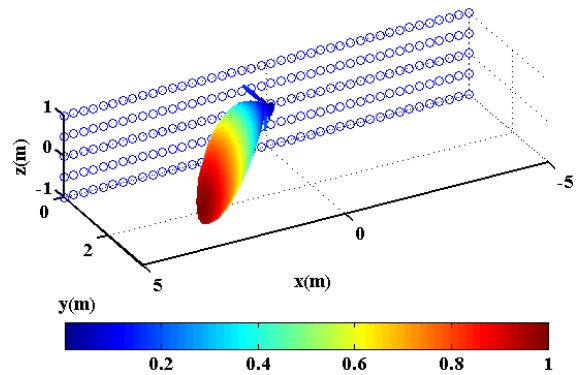


Fig. 8. Plane array configuration



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



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

Fig. 9. Beam pattern and beam steering for plane array

2) FOM 계산

판배열 소나의 제원을 이용하여 FOM을 도출하기 위해, SL은 2차 세계대전 당시 측정된 잠수함 프로펠러 방사소음레벨 110dB로 설정하였으며^[25], 소음준위(NL)는 Wentz곡선에서 풍속 2.5m/s, 1kHz에서의 값

55dB로 가정하였다^[25]. DI는 Fig. 9에서와 같이 수평각(θ)에 대한 빔조향 결과로부터 도출하였으며 Fig. 10과 같다.

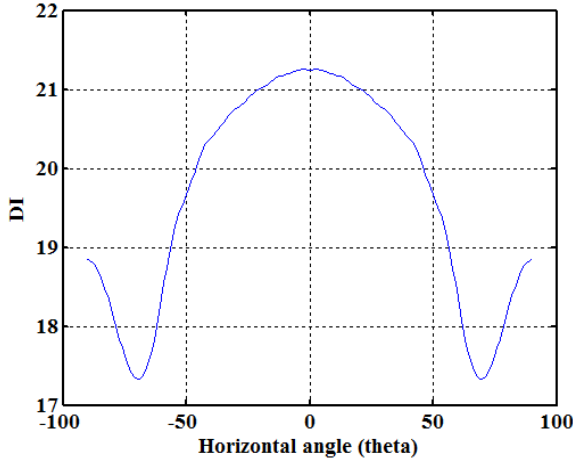


Fig. 10. DI as a function of beam steering for horizontal angle(θ)

DT 결정을 위해 식 (5)의 Passive Broadband Power Detector^[27]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 DT를 계산하였다.

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

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

DL 값은 Fig. 9에서 계산한 3차원 빔패턴($B(\theta, \phi)$) 값을 적용하여 식 (7)과 같이 계산할 수 있으며, 빔패턴의 주엽방위에 대한 나머지 방위의 상대적인 손실 값으로 정의된다^[28]. 본 논문에서는 자함과 표적의 중심이 동일하여 수직각방향(ϕ , 수심방향)으로 변화가 없으므로, 수직각방향(ϕ) DL은 0이며 수평각방향(θ)

DL만 고려하였다.

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

Fig. 11은 앞서 계산한 해양환경에 대한 TL 및 DL, FOM, SE를 거리·방위에 대해 계산한 결과이다.

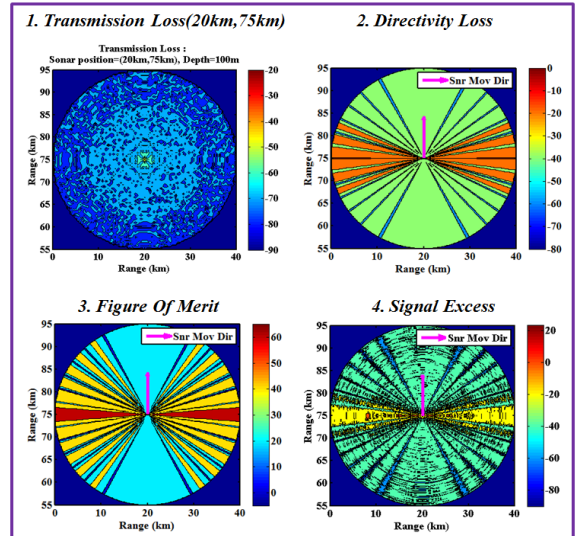


Fig. 11. Distributions of TL, DL, FOM, and SE as a function of direction and range

Fig. 11의 TL은, Fig. 6의 작전해역에서 자홍색으로 표기된 위치($X=20\text{km}$, $Y=75\text{km}$, 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, DL, FOM 및 SE는 소나기동방위(SnrMovDir)가 90°, 빔조향각이 0°일 경우 결과 값이다. 소나기동방위는 오른쪽 방향 0°를 기준으로 반시계방향으로 360°까지 설정하였으며, 빔조향각 0°는 표적함의 양측면에 하나씩 위치한 관배열 소나의 broadside 방향인 왼쪽방향과 오른쪽방향을 나타낸다. TL을 20km까지 계산하였으므로 소나위치를 중심으로 20km 반경 내의 결과 값만 유효하다. SE는 식 (3)으로부터 도출되며 식 (4)와 같이 SE의 Log-normal 분포로부터 탐지확률을 계산할 수 있다.

3) 빔조향에 따른 탐지확률

Fig. 11에서 계산된 SE로부터 수평 빔조향각(θ)이

0°일 때의 탐지확률 분포는 Fig. 12와 같으며, 빔조향 각에 따른 탐지확률 값을 계산한 결과는 Fig. 13에 나타내었다. 표적함의 양 측면에 판배열 소나가 위치해 있으므로, 빔조향 시 broadside 방향이 0° 방향이며, 빔조향 각도는 -90°(아래방향)~+90°(위쪽방향)이다. 탐지확률 값의 범위는 0~1이지만, 효과적인 결과확인을 위해서 colorbar 레벨을 0~0.5로 조절하여 도식화하였다.

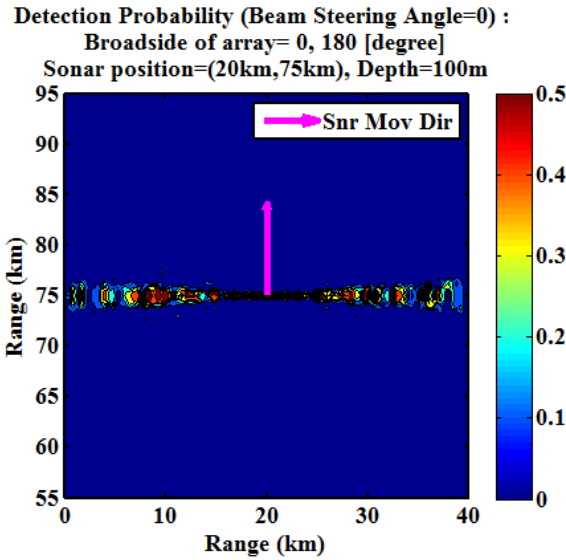


Fig. 12. P_d for 0° beam steering angle($\theta=0^\circ$)

4) 소나기동방위에 따른 탐지확률

본 논문에서는 소나기동방위에 따른 소나의 자세각을 고려하기 위해서 소나기동방위가 주어진 경우, 전방위표적에 대해 빔조향을 실시하여 탐지확률을 계산하였으며 Fig. 14와 같다. Fig. 14는 소나기동방위(SnrMovDir)가 90°일 경우 Fig. 13의 전방위 표적에 대한 빔조향 결과에서 주엽방위의 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 주엽방위만 고려하였기 때문에 방향손실(DL)은 없으므로, 탐지확률 값은 Fig. 10의 DI 및 TL에 의해 영향을 받게 된다. 그 결과 Fig. 14에서 소나기동방위가 90°일 경우, 양 측면에 위치한 판배열 소나의 broadside 방향이 endfire 방향보다 탐지확률이 상대적으로 높음을 확인할 수 있다.

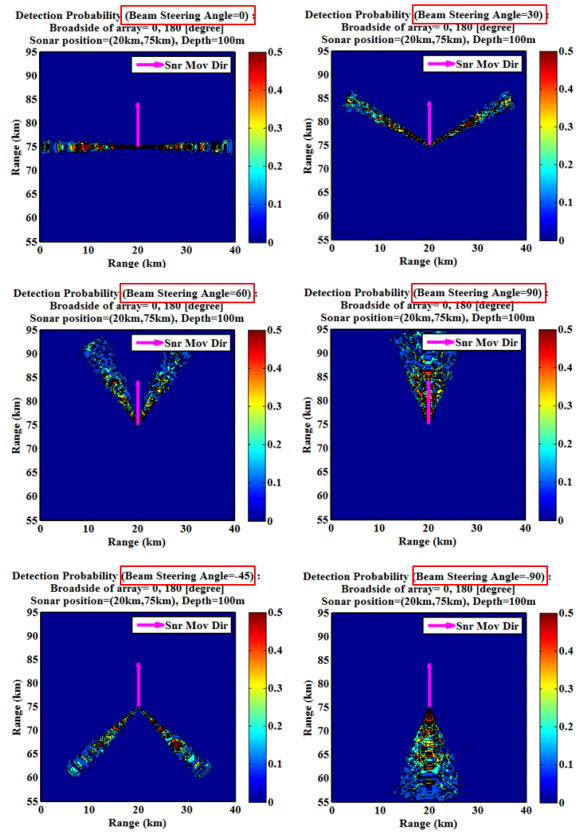


Fig. 13. P_d as a function of beam steering angle

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

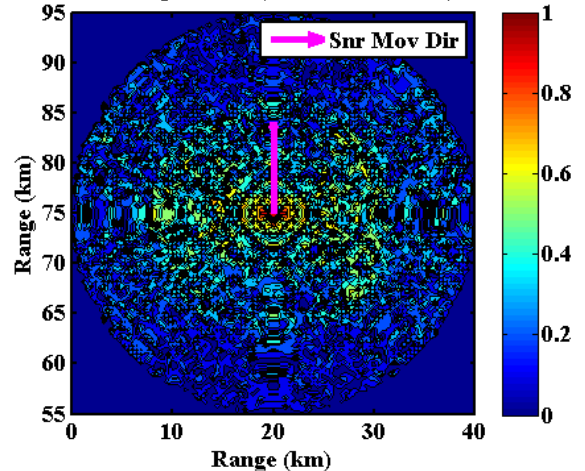


Fig. 14. P_d against the omnidirectional targets for 90° sonar movement direction

Fig. 15는 소나기동방위에 따른 탐지확률 분포이며, 소나기동방위에 의해 소나자세각이 변화될 경우 동일 표적위치에 대한 탐지확률 값의 변화를 확인할 수 있다. 동일 조건인 Fig. 14의 소나기동방위 90°일 때의 탐지확률 결과 값과 Fig. 15의 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. 15에서 확인할 수 있듯이, 기동방위에 따른 소나의 broadside 방향이 endfire 방향에 비해 탐지확률 값이 상대적으로 높음을 확인할 수 있다.

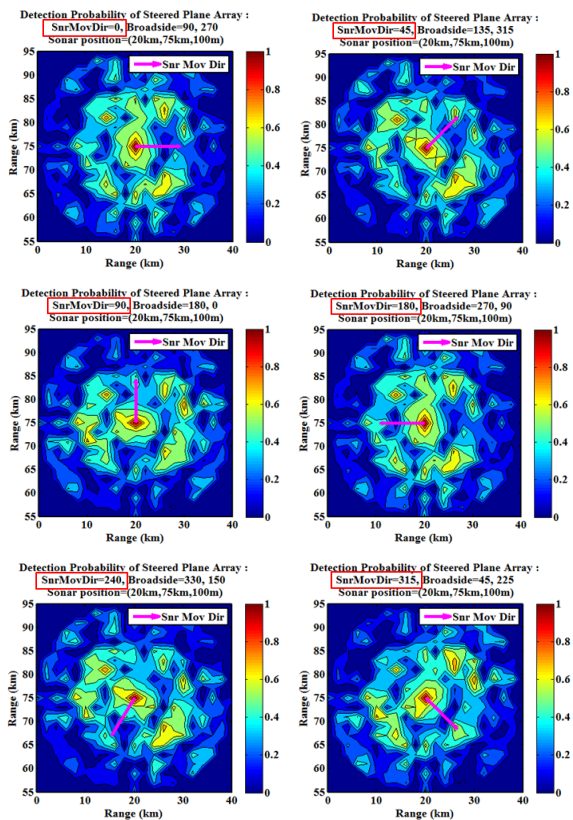


Fig. 15. P_d as a function of sonar movement direction (plane array)

소나기동방위가 90°일 경우 작전해역 전체의 탐지확률 및 탐지거리 분포도를 계산한 결과는 Fig. 16~17과 같다. 작전해역에서 TL을 계산한 위치인 Fig. 6의 푸른색 원으로 표기된 모든 지점에서 거리 20km 내에 있는 모든 방위의 표적에 대해 탐지확률을 계산하여 Fig.

16에 나타내었으며, 계산한 탐지확률 결과 값을 거리에 대해 적분하여 Fig. 17과 같이 소나성능을 탐지거리로 표현하였다. Fig. 17의 탐지거리 분포도에서 작전해역 좌측상단 부분의 소나 탐지성능이 다른 영역에 비해 상대적으로 높은 이유는, Fig. 6의 작전해역 수심정보에서 확인할 수 있듯이 다른 해역에 비해 수심이 낮아서 해양의 도파관(waveguide) 효과증가로 인해 음파의 기하학적 확산손실이 감소했기 때문이라 판단된다.

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

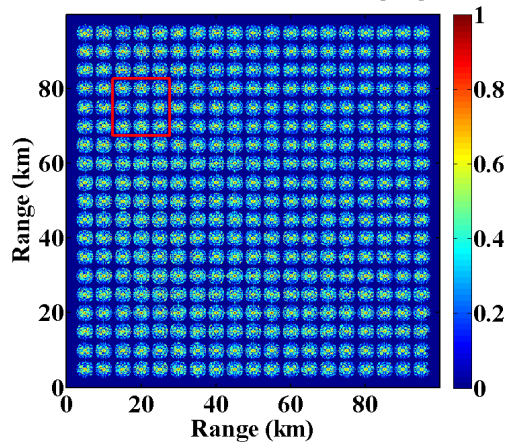


Fig. 16. P_d distribution for the plane array in search area

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

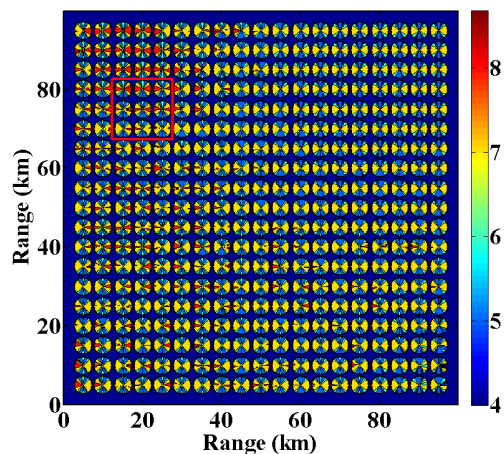


Fig. 17. Detection radius distribution for the plane array in search area

Fig. 18~19는 Fig. 16~17의 붉은색 사각형 지점을 확대한 그림이며, 동일 소나기동방위(90°) 및 소나위치 (20km, 75km, 100m)에 대해 앞서 기술한 Fig. 15의 좌측 중앙결과와 Fig. 18의 정중앙에 위치한 탐지확률 분포 값이 일치함을 확인할 수 있다. 즉, Fig. 16~19의 원모양의 탐지확률 및 탐지거리 분포의 의미는 소나가 원의 중심에 위치했을 경우, 20km 반경 내의 모든 거리·방위에 존재하는 표적에 대한 탐지확률 분포 및 전방위 표적에 대한 탐지거리를 축소하여 표현한 결과 값이며, Fig. 16~19의 Range로 표기된 x축, y

축은 소나가 위치한 지점을 나타낸다. Fig. 19에서 탐지거리 값이 방위가 아닌 거리에 대해 변화가 발생하는 이유는 시뮬레이션을 수행한 matlab의 내장 그래픽 함수인 `contourf`의 특성에 기인한 것이며, 실제 탐지거리 계산 결과 값은 방위만의 함수이며 거리에 대해서는 단일 값이다. 본 논문에서는 전체적인 경향 파악이 유용하다 판단하여 `contourf` 함수를 이용하였다. Fig. 20~25는 소나 기동방위에 따른 작전해역의 탐지확률 및 탐지거리 분포를 계산하여 Fig. 16~17의 붉은색 사각형 지점만 도식화한 결과이다.

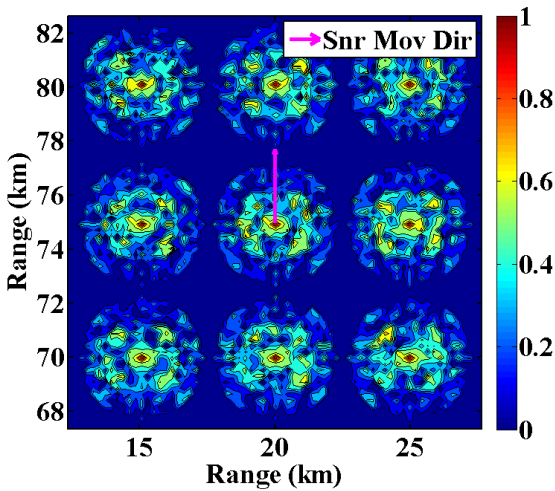


Fig. 18. P_d distribution for 90° sonar movement direction

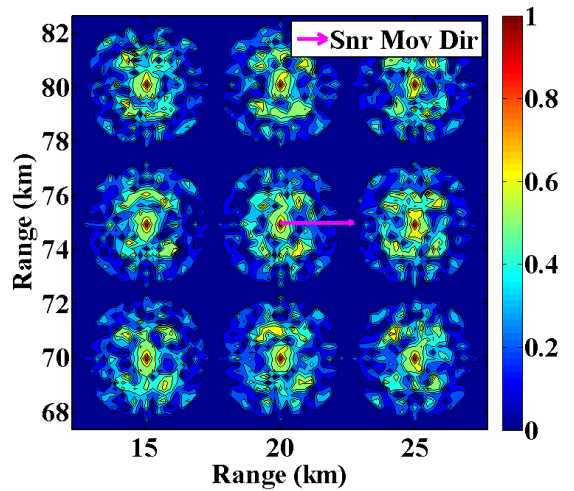


Fig. 20. P_d distribution for 0° sonar movement direction

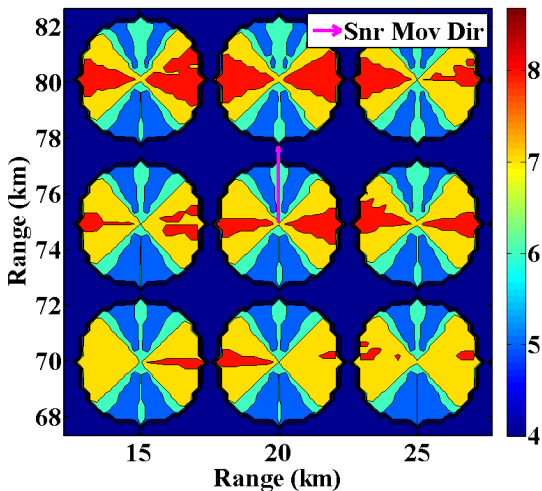


Fig. 19. Detection radius distribution for 90° sonar movement direction

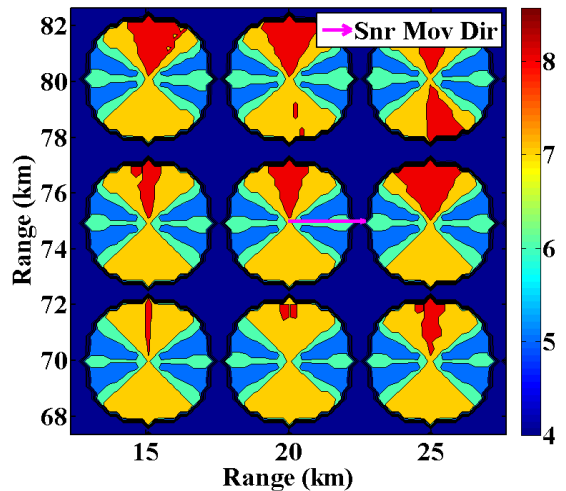


Fig. 21. Detection radius distribution for 0° sonar movement direction

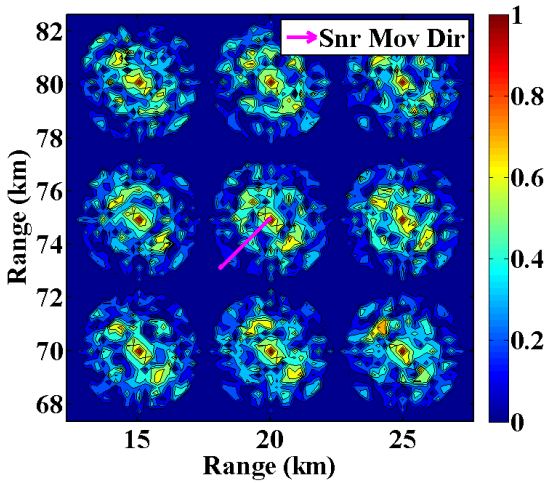


Fig. 22. P_d distribution for 225° sonar movement direction

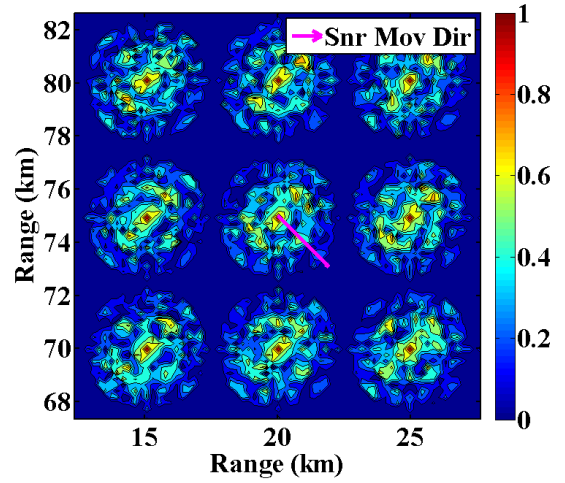


Fig. 24. P_d distribution for 315° sonar movement direction

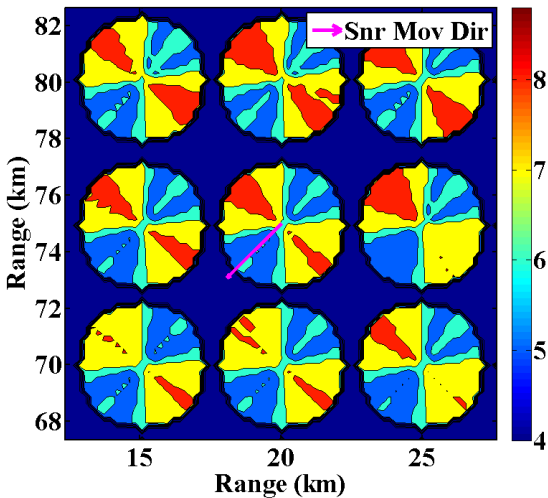


Fig. 23. Detection radius distribution for 225° sonar movement direction

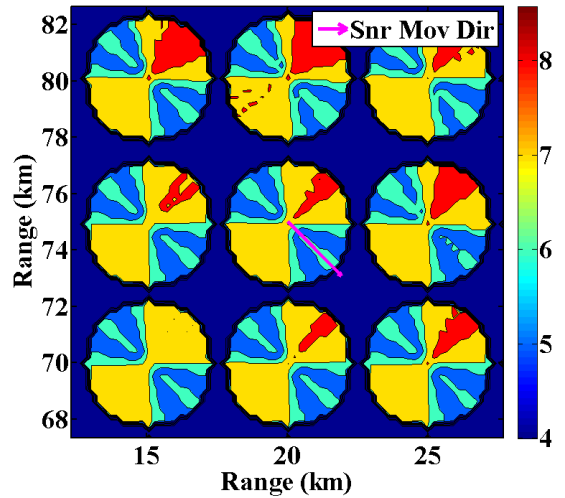


Fig. 25. Detection radius distribution for 315° sonar movement direction

다. 선배열소나(자함소나)의 탐지확률 계산

선배열 소나의 제원은 Fig. 26과 같이 길이 105m로 가정하였고, 수치적분법^[26]을 이용한 빔패턴 계산을 위해 점음원을 길이 방향으로 141개 배치하였다. 본 논문에서 선배열 소나는 자함이 표적탐지를 위해 운용하는 소나이다.

TL 및 FOM 계산을 위한 소나방정식 파라미터는 앞서 기술한 관배열 소나와 동일하게 계산하였으며, Fig. 27은 선배열 소나형상으로부터 도출한 빔패턴을 이용하여 수평각 빔조향에 따른 DI를 계산한 결과이다.

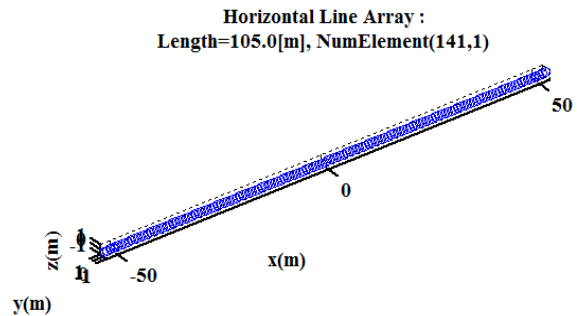


Fig. 26. Line array configuration

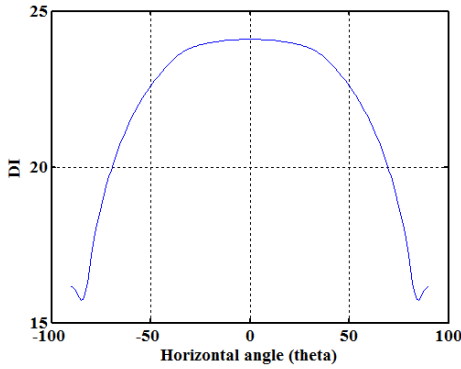


Fig. 27. DI as a function of beam steering for horizontal angle(θ)

이 판배열소나 보다 협소하여 빔조향에 따른 에너지 집중도가 높으며, 그 결과 Fig. 15의 판배열소나의 경우 보다 선배열소나가 상대적으로 탐지확률 값이 높음을 Fig. 28을 통해 확인할 수 있다.

판배열소나와 동일하게 소나기동방위(SnrMovDir)가 90°일 경우 작전해역 전체에 대한 선배열소나의 탐지확률 및 탐지거리 분포도는 Fig. 29~30과 같으며, Fig. 17의 판배열소나 탐지거리 분포도에 비해 선배열소나의 broadside 방향 탐지성능이 대체적으로 우수함을 확인할 수 있다.

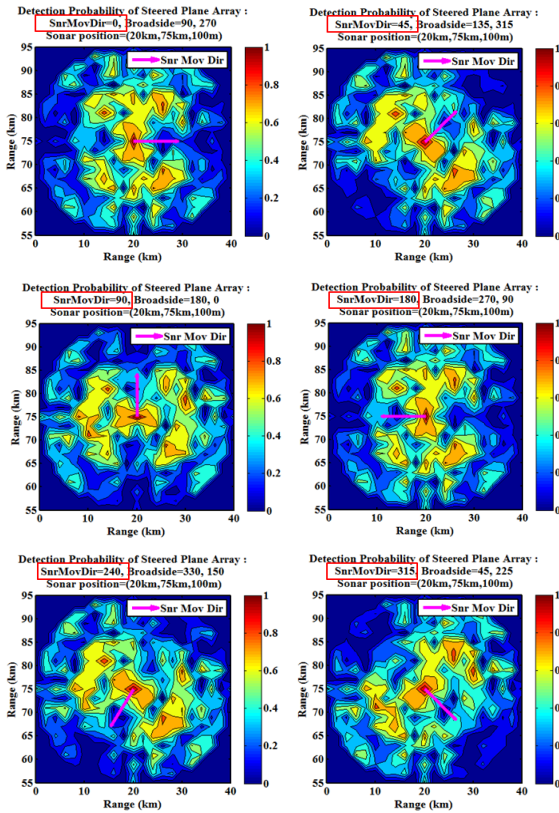


Fig. 28. P_d as a function of sonar movement direction (line array)

판배열 소나와 동일한 과정으로 계산한 선배열소나의 소나기동방위에 따른 탐지확률 분포는 Fig. 28과 같으며, 소나자세각 변화에 따른 동일표적위치에서의 탐지확률 값 변화를 확인할 수 있다. 선배열소나의 빔폭

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

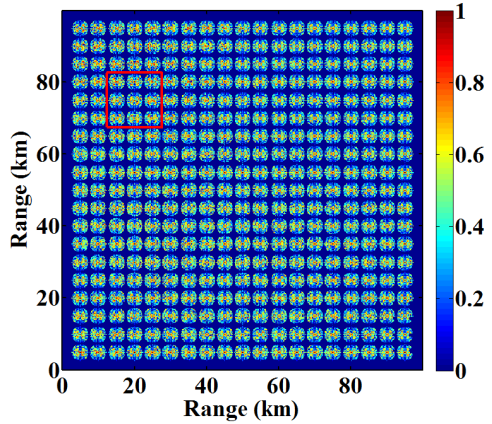


Fig. 29. P_d distribution for the line array in search area

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

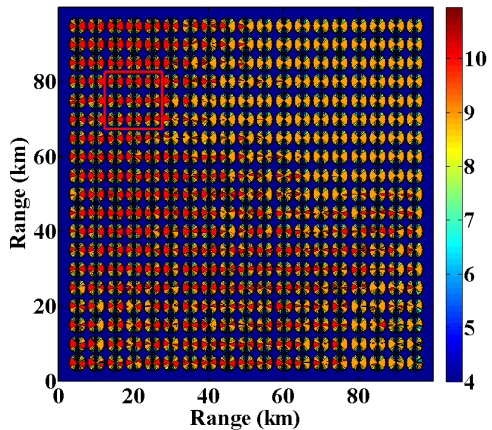


Fig. 30. Detection radius distribution for the line array in search area

Fig. 29~30의 붉은색 사각형 지점을 확대하여 Fig. 31~32에 나타내었으며, 소나기동방위가 90°일 경우 소나가 위치한 지점을 중심으로 임의의 표적위치(방위, 거리)에 대한 탐지성능을 확인할 수 있다. Fig. 33~34는 소나기동방위 0°일 경우 작전해역의 임의의 표적에 대한 탐지확률 및 탐지거리 분포를 계산하여 Fig. 29~30의 붉은색 사각형 지점만 도식화 한 결과이다.

본 절에서 계산한 판배열소나(표적소나)와 선배열소나(자함소나)의 자세각 변화에 따른 탐지확률 계산결과를 적용하여 주어진 기동시나리오에 대한 추적효과도 분석을 수행하였다.

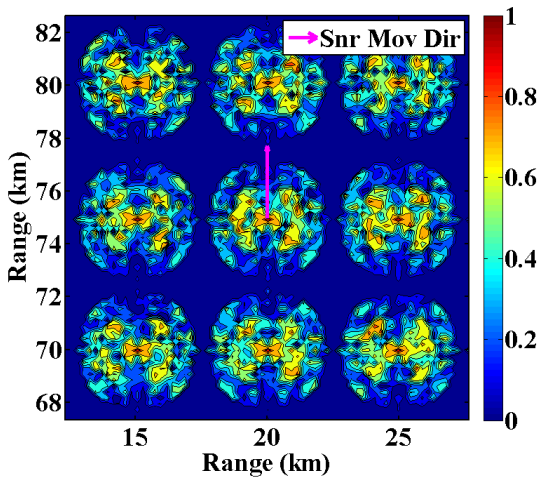


Fig. 31. P_d distribution for 90° sonar movement direction

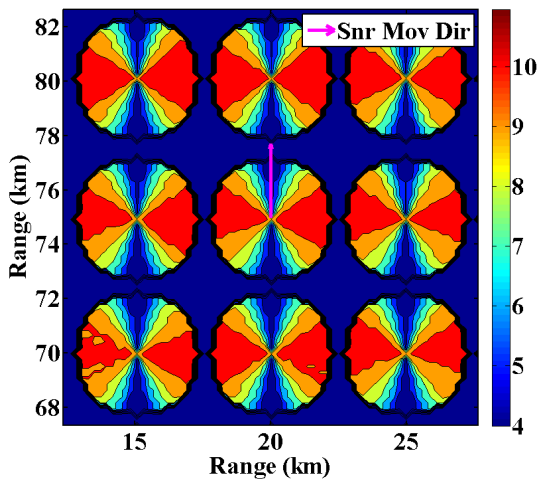


Fig. 32. Detection radius distribution for 90° sonar movement direction

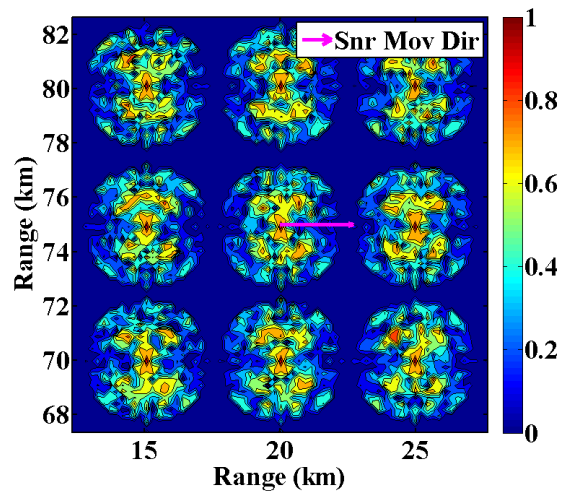


Fig. 33. P_d distribution for 0° sonar movement direction

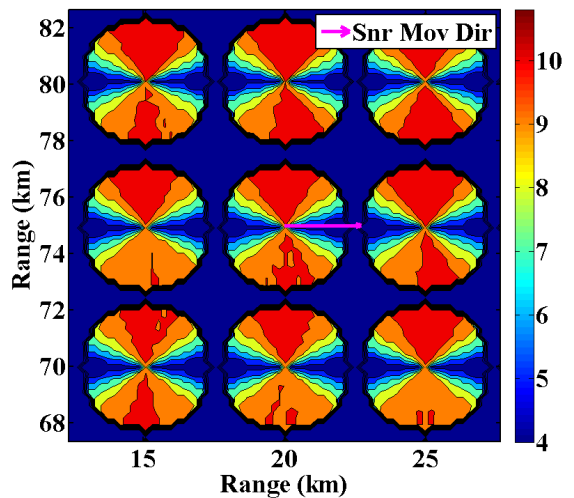


Fig. 34. Detection radius distribution for 0° sonar movement direction

4. 기동 시나리오 정의

3장에서 계산한 판배열소나(표적소나)와 선배열소나(자함소나)를 적용하여 추적효과도 분석을 수행하기 위해, 표적 및 자함의 기동시나리오를 정의하였다. 표적의 기동시나리오는 Fig. 35의 자홍색선과 같으며, 기동시작지점(90km, 10km)에서 종료지점(End)까지 시속 8km/hour의 속도로 18시간동안 동해의 천해방향으로 칩투작전을 수행한다고 가정하였다.

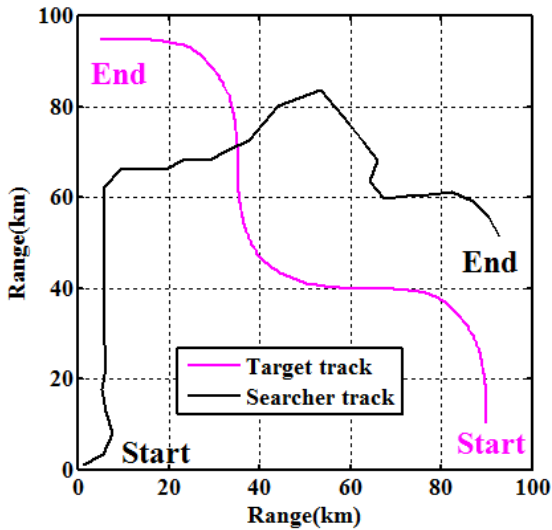


Fig. 35. Target and searcher(own ship) track

본 논문에서는 주어진 표적기동경로에 대해 현실성 있는 자함기동경로를 생성하여 추적효과도를 분석하기 위해, 주어진 해양환경과 탐지세력의 음향정보를 바탕으로 최적의 음향탐색패턴을 도출하는 OASPP 알고리즘을 적용하였다^{9~14}. OASPP 알고리즘은 소나의 탐지 알고리즘과 복잡한 탐색경로문제에 활용되는 유전알고리즘을 이용하여 개발되었으며, 주어진 해양환경에서 효율적인 탐색경로를 도출함을 입증한 바 있다^{9~15}. Fig. 35의 검은색 선은 OASPP 알고리즘에 유전알고리즘의 다중목적함수^{17,18}를 적용하여 탐지 및 피탐지(counter-detection)성능을 동시에 고려하여 생성된 최적 탐색패턴이며, 이를 본 논문의 자함기동 사나리오로 정의하였다. 시뮬레이션에서 자함의 경우 기동시작지점(1km, 1km)에서 종료지점(End)까지 시속 10km/hour의 속도로 기동하며, 총 기동시간은 표적과 동일한 18시간이다. 현실적인 추적효과도 분석을 위해서 유전알고리즘의 다중목적함수^{17,18}를 추적효과도 분석 알고리즘에 적용하여 표적에 의해 자함이 피추적 될 위험성인 취약성 분석에 활용하였다.

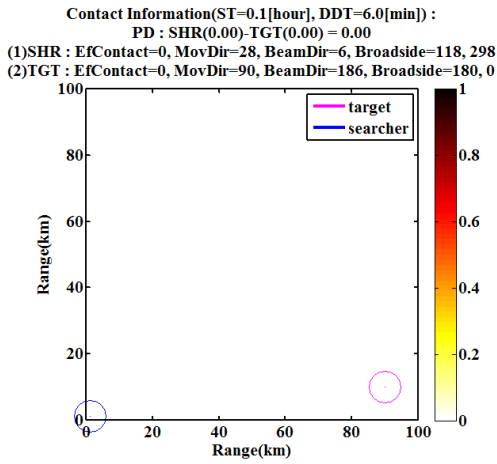
5. 추적효과도 분석

3장에서 계산한 소나의 추적성능이 고려된 탐지확률 값을 이용하여 주어진 표적 및 자함 기동시나리오에 대해 기동시간대별 소나접촉정보를 분석하였으며,

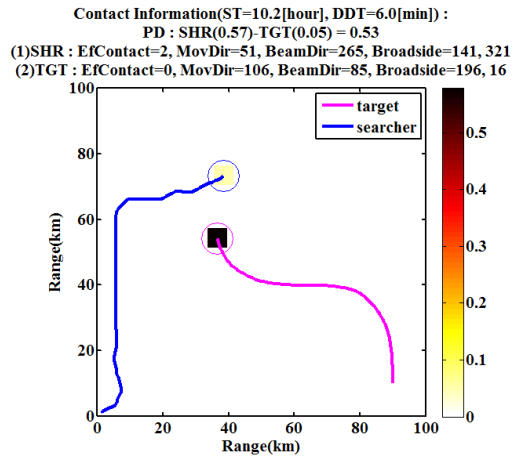
이를 이용하여 Fig. 5에서 정의한 추적효과도 분석방안으로 추적효과도 분석, 취약성 분석 및 취약성을 고려한 추적효과도 분석을 수행하였다.

가. 시간대별 소나접촉정보

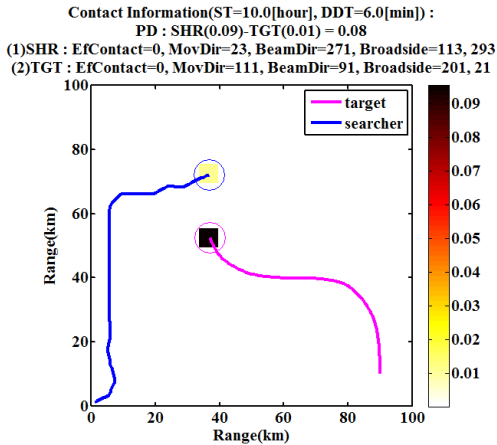
추적효과도 분석을 위해 Fig. 36과 같이 기동시간대별 소나접촉정보를 분석하였다. 소나접촉정보는 3장에서 기술한 바와 같이 TL 계산거리인 20km 반경 내에 표적과 자함이 위치할 경우 발생하게 되며, 시뮬레이션에서 총 18시간의 기동시간 동안 소나를 이용한 탐지간격을 6분, 1.5분, 1분으로 설정하여 결과를 비교하였다. 탐지간격에 따라서 추적효과도 분석결과가 다를 수 있으므로, 본 논문에서는 실제 적용되는 소나의 탐지간격 적용이 용이하도록 탐지간격을 변수로 설정하였다. Fig. 36은 소나자세각에 따른 거리 및 방위에 대한 탐지확률을 이용하여 상대세력에 대한 탐지를 6분 간격으로 수행한 결과이며, colorbar는 탐지확률 값으로 소나와 표적의 상대적인 추적성능을 파악하기 위해서 colorbar 레벨을 탐지시점마다 조절하였다. 기동시간대별 소나접촉정보 결과검증 및 추적효과도 분석을 목적으로, 총 탐색시간(ST), 탐지간격(DDT), 탐지확률(PD), 탐지확률 값이 0.1 이상이 되는 유효탐지횟수(EfContact), 소나기동방향(MovDir), 상대세력위치에 따른 빔 조향각(BeamDir), 기동방향에 따른 소나의 broadside 방향을 계산하였다. Fig. 36(a)는 최초기동시점을 나타내며, Fig. 36(b)는 자함과 표적이 기동 후 10시간 만에 탐지가능반경 20km 내에 위치하게 되어 최초로 소나접촉을 하는 시점이다. 최초접촉시점에서 자함의 경우 표적을 탐지할 확률(SHR)이 0.09이며, 표적이 자함을 탐지하는 피탐지확률(TGT)은 0.01로 앞서 정의한 유효탐지확률 값(0.1) 보나 낮으므로 유효탐지횟수는 자함과 표적 모두 0이 된다. Fig. 36(c)의 경우 자함이 탐지확률 0.67로 표적을 탐지하며, 피탐지확률은 0.06이므로 자함의 유효탐지횟수는 1이 되며 표적의 유효탐지횟수는 0으로 동일하다. Fig. 36(c)의 두 번째 소나접촉시점에서 탐지확률과 피탐지확률이 확연한 차이를 보이는 이유는 자함이 표적소나(편배열소나)의 추적성능이 저조한 endfire 방향에 위치해서 자함소나(선배열소나)의 추적성능이 우수한 broadside 방향으로 표적에 대한 탐지를 수행했기 때문이며, 피탐지 위험성을 최소화 하고 운용소나의 성능을 극대화시키는 OASPP 알고리즘으로 자함의 기동경로를 생성한 것에 기인하였다.



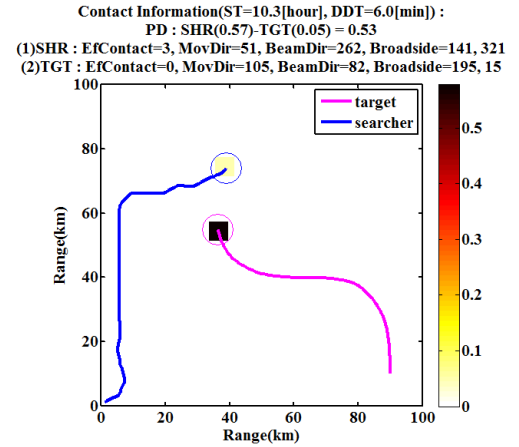
(a) Start of maneuver(maneuver time=0.1hour)



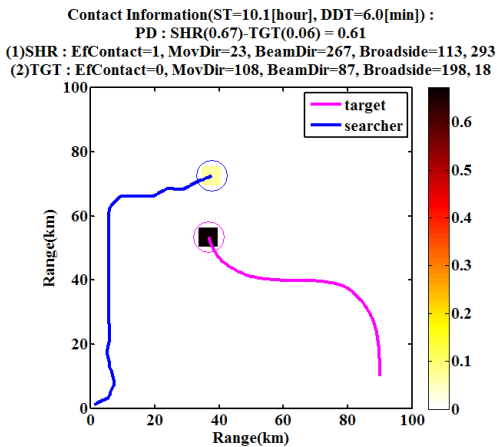
(d) Contact point #3(maneuver time=10.2hour)



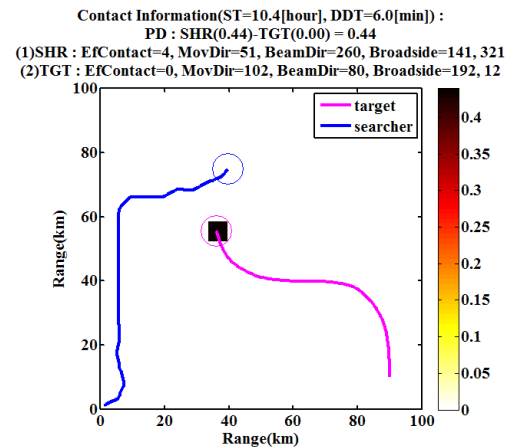
(b) Initial contact point #1(maneuver time=10hour)



(e) Contact point #4(maneuver time=10.3hour)

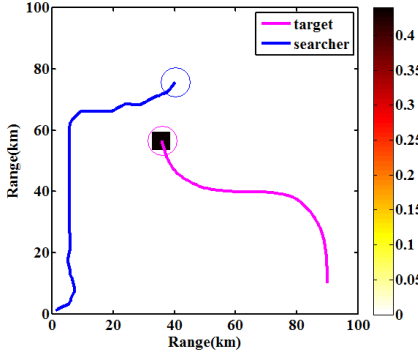


(c) Contact point #2(maneuver time=10.1hour)



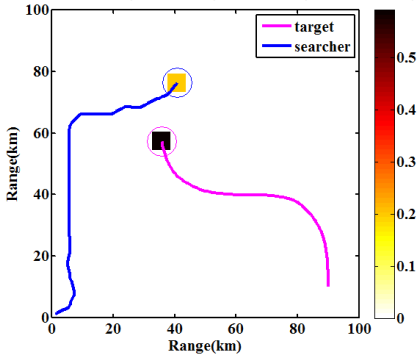
(f) Contact point #5(maneuver time=10.4hour)

Contact Information(ST=10.5[hour], DDT=6.0[min]) :
 PD : SHR(0.44)-TGT(0.00) = 0.44
 (1)SHR : EfContact=5, MovDir=51, BeamDir=258, Broadside=141, 321
 (2)TGT : EfContact=0, MovDir=100, BeamDir=78, Broadside=190, 10



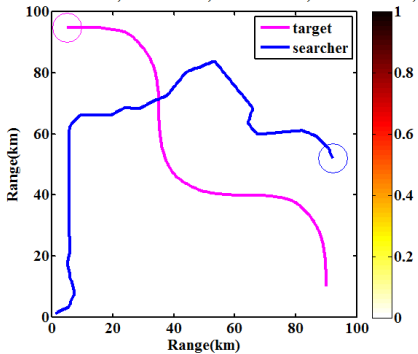
(g) Contact point #6(maneuver time=10.5hour)

Contact Information(ST=10.6[hour], DDT=6.0[min]) :
 PD : SHR(0.59)-TGT(0.20) = 0.39
 (1)SHR : EfContact=6, MovDir=51, BeamDir=255, Broadside=141, 321
 (2)TGT : EfContact=1, MovDir=99, BeamDir=75, Broadside=189, 9



(h) Final contact point #7(maneuver time=10.6hour)

Contact Information(ST=18.0[hour], DDT=6.0[min]) :
 PD : SHR(0.00)-TGT(0.00) = 0.00
 (1)SHR : EfContact=6, MovDir=297, BeamDir=154, Broadside=27, 207
 (2)TGT : EfContact=1, MovDir=180, BeamDir=334, Broadside=270, 90



(i) End of maneuver(maneuver time=18hour)

Fig. 36. Sonar contact information as a function of maneuver time

본 시뮬레이션에서 탐지간격이 0.1시간(6분)이므로, Fig. 36(b)의 최초소나접촉시점부터 Fig. 36(h)의 마지막 접촉시점까지 총 7번의 소나접촉을 하며, 접촉시간은 36분이 된다. 즉, 표적과 접촉하는 36분 동안 자함의 기동경로는 표적의 endfire 방향에 위치해서 자함소나의 broadside 방향으로 표적에 대한 추적을 수행한 뒤, Fig. 36(h)~(i)와 같이 표적소나의 broadside 방향에 위치하기 직전에 탐지가능거리(20km) 밖으로 회피하는 것을 확인할 수 있다. 이후, 표적이 기동하는 곳은 3장의 Fig. 17에서 계산한 작전해역의 탐지거리 분포도에서 확인하였듯이 상대적으로 표적소나의 탐지성능이 높아지는 위치이므로 피탐지에 의한 취약성을 고려해 자함기동경로가 표적을 더 이상 추적하지 않는다.

나. 추적효과도 분석

Fig. 36의 기동시간대별 소나접촉정보를 이용하여 추적효과도 분석, 취약성 분석인 피추적효과도를 분석 및 취약성을 고려한 추적효과도를 분석하여 Fig. 37에 도식화하였다. Fig. 37에서 colorbar는 각 기동시점에서 상대세력에 대한 탐지확률 값이며, 표적경로 위의 탐지확률 값들은 자함이 표적을 추적한 추적경로이며, 자함경로 위의 피탐지확률 값들은 표적이 자함 추적한 결과이다. 앞서 정의한 Fig. 5의 추적효과도 분석 방법을 적용하기 위해 Fig. 37(a)의 상단에 전체추적기회(TrOp), 유효추적횟수(NumTr)를 계산하여 추적확률(SHR)과 피추적확률(TGT)을 도출하였다. Fig. 36의 기동시간대별 소나접촉정보에서 자함의 경우 총 7번의 표적접촉기회가 있었으며 Fig. 36(b)의 접촉시점 #1을 제외한 나머지 6번은 모두 탐지확률이 0.1 이상인 유효탐지이므로 Fig. 5의 추적결정조건을 위한 3번의 유효탐지를 고려해서 추적효과도를 계산하며 전체추적기회=3, 유효추적횟수=3, 즉 3/3으로 추적효과도(SHR)는 1이 된다. 표적의 경우 자함과의 접촉기회가 7번으로 동일하지만 Fig. 37(a)의 붉은색 원으로 표기된 부분을 확대한 Fig.37(b)의 추적정보 소실구간으로 인해서 유효탐지횟수는 1번으로 피추적효과도(TGT)는 0이다. 최종적으로 본 논문의 MOE인 취약성을 고려한 추적효과도는 1-0=1로 표적을 100%로 추적함을 예측할 수 있다.

본 시뮬레이션에서는 Fig. 37(a)의 상단에 표기된 것과 같이 표적과 자함이 소나로 탐지를 수행하는 간격(DDT)을 6분으로 설정하였기 때문에, 정해진 기동경로에서 소나로 접촉을 유지하는 시간(TCT)인 36분 동안,

소나접촉기회는 총 7번 밖에 되지 않는다. 즉, 소나접촉유지시간에 대한 탐지횟수가 실제소나시스템에 비해 적으므로, 탐지간격(DDT)을 1.5분, 1분으로 설정하여 동일시나리오에 대해 추적효과도 분석을 수행하였으며, 결과는 Fig. 38~39와 같다. Fig. 38(b)와 Fig. 39(b)는 Fig. 38(a)와 39(a)의 붉은색 원으로 표기된 지점을 각각 확대한 것이며, 2장의 Fig. 5에서 정의한 추적정보 소실구간을 확인할 수 있다.

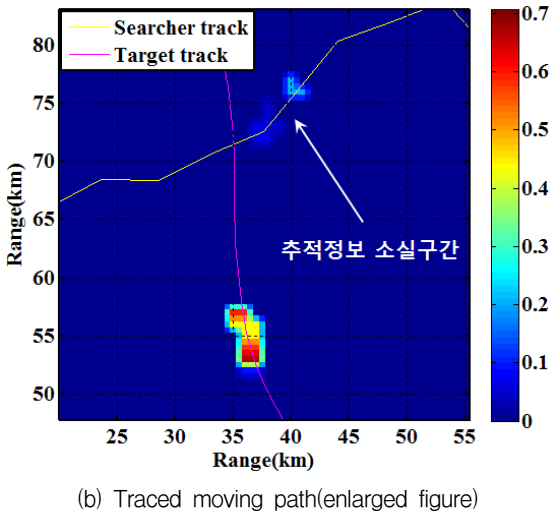
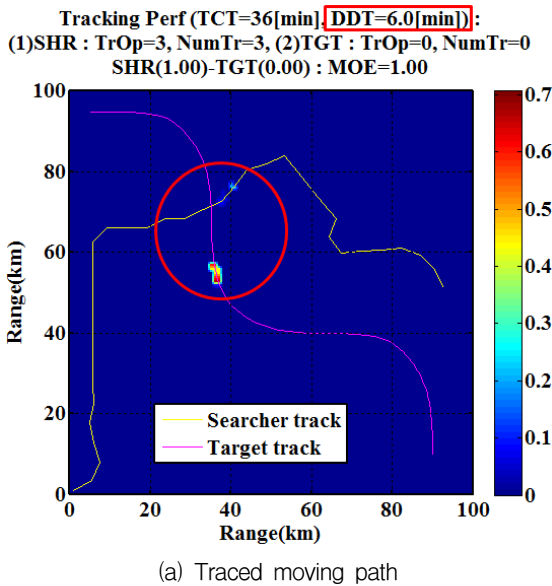


Fig. 37. MOE analysis for tracking (detection interval=6min)

Tracking Perf (TCT=45[min], **DDT=1.5[min]**):
 (1)SHR : TrOp=28, NumTr=26, (2)IGT : TrOp=28, NumTr=11
 SHR(0.93)-TGT(0.39) : MOE=0.54

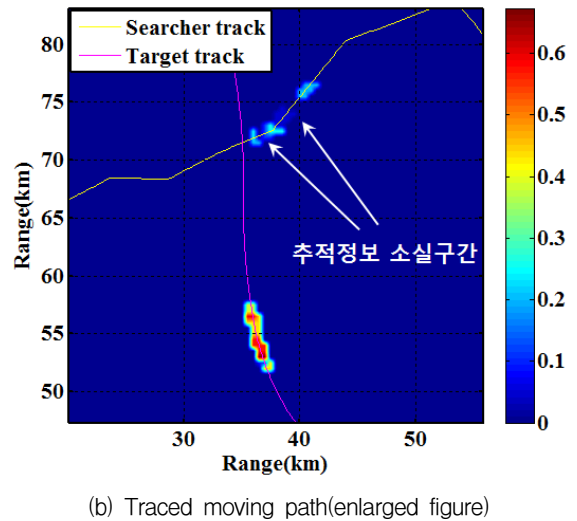
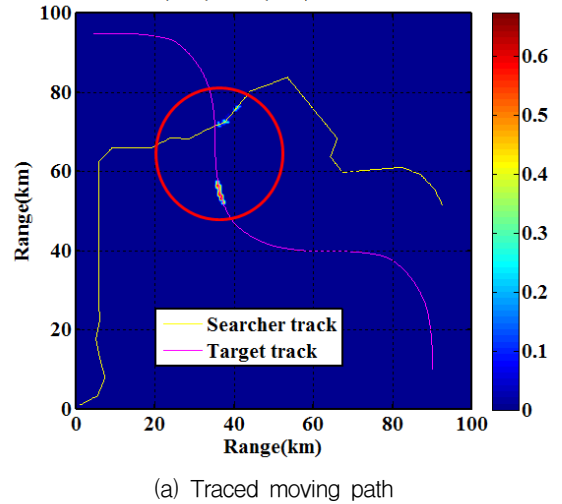
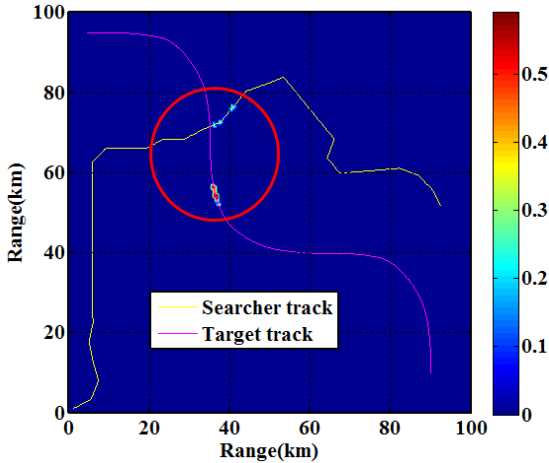


Fig. 38. MOE analysis for tracking (detection interval=1.5min)

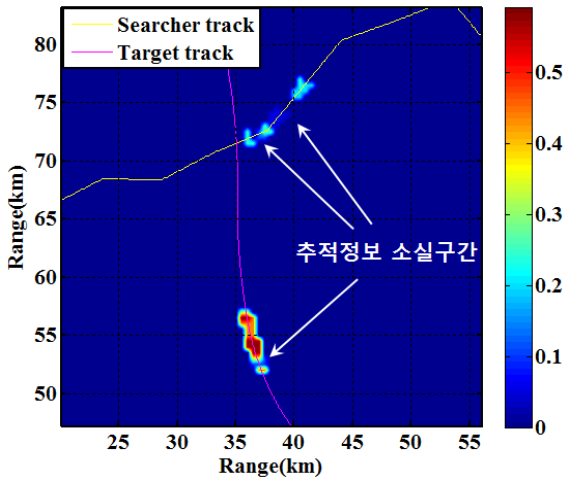
탐지간격 1.5분으로 해서 동일 시나리오에 대한 추적효과도를 분석했을 경우, Fig. 37의 탐지간격 6분의 결과와 확연한 차이가 있음을 확인할 수 있다. Fig. 38의 결과에서 소나접촉유지시간(TCT)이 45분으로 증가했으며, 자함의 추적효과도의 경우 전체추적기회(TrOp) 28번, 유효추적횟수(NumTr) 26번으로 추적효과도는 $26/28=0.93$ 이며, 피추적효과도는 전체추적기회 28번, 유효추적횟수 11번으로 $11/28=0.39$ 이다. 즉, 취약성을

고려한 추적효과도(MOE)는 $0.93-0.39=0.54$ 로 Fig. 37의 분석결과와 비교했을 때 큰 차이가 있다. 또한, Fig. 38(b)에서 표적이 자함을 피추적할 경우 발생하는 추적정보 소실구간의 위치를 Fig. 37(b)의 결과에 비해 정확히 확인할 수 있다.

Tracking Perf (TCT=45[min], **DDT=1.0[min]**):
 (1)SHR : TrOp=43, NumTr=40, (2)TGT : TrOp=43, NumTr=19
 SHR(0.93)-TGT(0.44) : MOE=0.49



(a) Traced moving path



(b) Traced moving path(enlarged figure)

Fig. 39. MOE analysis for tracking (detection interval=1min)

탐지간격을 1분으로 설정하여 분석한 Fig. 39의 결과는 탐지간격 1.5분인 Fig. 38의 결과와 확연한 차이는

없지만, Fig. 39(b)의 표적경로위의 탐지확률 값에서 자함의 추적성능이 낮아지는 추적정보 소실구간이 명확해 짐을 확인할 수 있었다. 그러므로 정확한 추적효과도 분석을 위해서 실제 소나시스템의 탐지간격을 적용할 필요성이 있으며, 본 논문의 추적효과도 분석 알고리즘에는 탐지간격(DDT) 값을 변수로 설정하여 조절 가능하도록 하였다.

탐지간격을 1분으로 설정하여 추적효과도 분석을 수행한 Fig. 39의 결과를 이용하여, 거리 및 방위에 대한 추적결과를 분석하였으며 Fig. 40~41과 같다. Fig. 40은 자함이 표적의 거리·방위를 추적한 결과이며, 파란색선이 실제표적의 기동경로이고, 붉은색 점으로 표기된 부분이 성공적으로 표적의 거리 및 방위정보를 추적한 결과를 나타낸다. Fig. 40 하단의 방위추적결과는 Fig. 36의 방위설정과 동일하게 오른쪽 방향 0°를 기준으로 반시계방향으로 360° 미만까지 설정하여, 자함의 위치에서 표적의 상대방위를 도식화한 것이다.

Fig. 41은 표적이 자함의 거리·방위를 피추적한 결과이며, 파란색선은 실제 자함의 기동경로를 의미하고, 붉은색 점으로 표기된 부분은 표적이 성공적으로 자함의 거리 및 방위정보를 피추적한 결과를 나타낸다.

Fig. 40~41 상단의 Time-Range 결과에서 본 논문에서 설정한 최대 탐지거리, 즉 TL 계산한 20km 이내에서 상대세력에 대한 추적이 이루어졌음을 확인할 수 있으며, 상대세력과의 거리가 20km 이내인 경우에도 소나자세각에 따른 상대세력과의 방위, 소나의 빔폭 및 해양환경 등의 영향으로 거리·방위에 대한 추적정보 소실구간이 발생함을 확인할 수 있다.

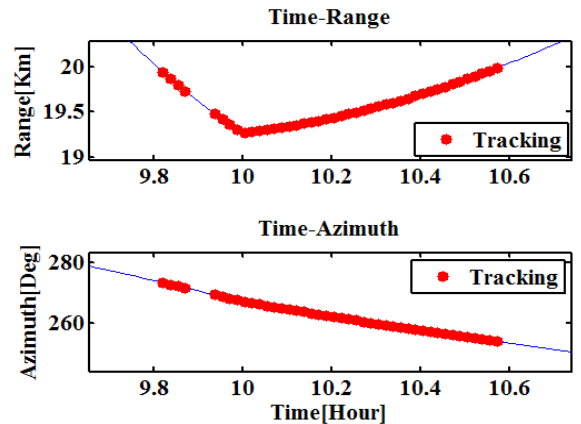


Fig. 40. Tracking results as a function of range and azimuth

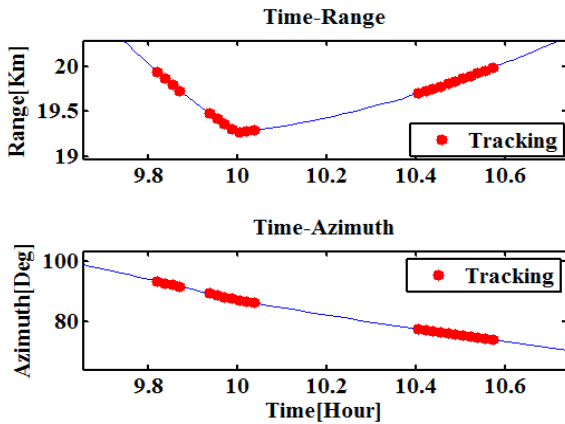


Fig. 41. Counter-tracking results as a function of range and azimuth

제안한 추적효과도 분석 방안과 선배열소나(자함소나) 및 판배열소나(표적소나)의 추적성능을 고려하여 시뮬레이션을 수행한 결과, broadside 방향으로 표적을 추적한 자함의 기동경로가 endfire 방향으로 자함을 피추적한 표적경로보다 상대적으로 추적성능이 높음을 추적효과도 분석을 통해 확인하였으며, 추적에 취약한 구간인 추적정보 소실구간도 예측할 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 실제 소나시스템의 추적성능을 고려한 추적효과도 분석방안을 제시하였으며, 작전해역의 해양환경정보를 바탕으로 획득한 소나의 음향정보와 자함 및 표적의 기동시나리오가 주어진 경우, 시뮬레이션을 통해 계산한 시간대별 소나접촉정보로부터 추적효과도 분석을 수행하였다.

추적효과도 분석을 위해서 위치추정 MOPs의 개념을 정리하였으며, 위치추정 MOPs 중 ‘유효한 표적접촉정보를 이용한 위치추정확률’의 개념을 소나를 이용한 음향전에 적합하도록 재해석하여 추적효과도 분석 방안으로 제시하였다. 또한, 실제 소나시스템의 추적성능에 영향을 미치는 요소를 추적효과도 분석에 반영하였다. 즉, 자함 및 표적의 기동경로에 의해 영향을 받는 소나자세각을 고려하였으며, 판배열소나와 선배열소나의 제원을 이용하여 빔패턴 계산 및 표적방위에 대한 빔조향기법을 적용한 탐지확률 값을 추적효과도 분석에 활용하였다. 주어진 표적기동경로에 대해 현실성

있는 자함기동경로를 생성하여 추적효과도를 분석하기 위해서 OASPP 알고리즘을 이용하였으며, 표적에 의해 자함이 피추적되는 위험성을 고려하기 위해서 유전알고리즘의 다중목적함수를 추적효과도 분석 알고리즘에 적용하였다.

제안한 추적효과도 분석방안으로 주어진 시나리오에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과, broadside 방향으로 표적을 추적한 자함의 기동경로가 endfire 방향으로 자함을 피추적한 표적경로보다 상대적으로 추적성능이 높음을 추적효과도 분석을 통해 확인하였으며, 소나자세각에 따른 표적과의 방위, 소나의 빔폭 및 해양환경 등의 영향으로 추적성능이 저조해 지는 추적정보 소실 구간도 분석 가능함을 확인하였다.

본 논문을 통해 해양환경 및 기동시나리오가 주어진 경우, 시뮬레이션 기반의 추적효과도 분석으로 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] http://en.wikipedia.org/wiki/Anti-submarine_warfare
- [8] Multiplying the Effectiveness of Naval ASW, Ultra ELECTRONICS.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 조정홍, "수중음향 모델링에 기반한 소나체계의 성능분석", 한국해양대학교 공학박사 학위논문, 2011. 8.
- [16] Jung-Hong Cho, Jea Soo Kim, Hyoung Rok Kim, and Seongil Kim, "Measure of Effectiveness Analysis for Tracking based on Detection in SONAR System", Workshop on Ultrasonics and Underwater Acoustics in Korea(IEICE-US Technical Committee Conference), August, 2012.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 양유경, 김성호, "적외선 주사 영상에서 소형 표적의 탐지 및 추적을 위한 신뢰성 있는 측정치 선택 기법", 한국군사과학기술학회지, 제11권, 제1호, pp. 75~84. 2008. 2.
- [20] 서익수, "예인형 수동소나에 적합한 전방위 표적 자동탐지 및 추적기법 성능 분석", 한국군사과학기술학회지, 제9권, 제3호, pp. 33~40, 2006. 9.
- [21] 김지은, 노창균, 이부환, "클러터 환경에 강인한 고속/소형의 접근 표적 탐지/추적", 한국군사과학기술학회지, 제14권, 제4호, pp. 676~683, 2011. 8.
- [22] Hae-Ho Lee and Taek-Lyul Song, "A Study on Automatic Target Detection and Tracking Algorithm with the PMHT in a Cluttered Environment", Journal of Institute of Control, Robotics and System, Vol. 16, No. 11, pp. 1125~1135, 2010.
- [23] 정윤식, 송택렬, "특정정보를 고려한 HPDAF를 이용한 적외선 영상 표적 탐지 및 추적기법 연구", 한국군사과학기술학회지, 제11권, 제4호, pp. 124~132, 2008. 8.

- [24] 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.
- [25] R. J. Urick, "Principles of Underwater Sound", 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [26] C. A. Balanis, "Uniform Circular and Rectangular Arrays for Adaptive Beamforming Applications", IEEE Antennas and Wireless Propagation, Vol. 4, pp. 351 ~ 354, 2005.
- [27] Ross L. Dawe, "Detection Threshold Modeling Explained", Defence Science and Technology Organisation(DSTO), Australia, 1997.
- [28] J. S. Kim, "Underwater Acoustics and Sonar Engineering", Korea Maritime Univ., Lecture Note, 2005.