

# 비 동질성 이산시간 흡수마코프체인을 활용한 탐지체계의 식별률 분석에 관한 연구

김성우 · 윤봉규<sup>†</sup>

국방대학교 운영분석학과

An Analysis on the Identification Rate of Detection System Using Non-Homogeneous Discrete Absorbing Markov Chains

Seong-Woo Kim · Bong-Kyoo Yoon

Korea National Defense University

## ■ Abstract ■

The purpose of airborne radars is to detect and identify approaching targets as early as possible. If the targets are identified as enemies, detection systems must provide defense systems with information of the targets to counter. Though many previous studies based on the detection theory of the target have shown various ways to derive detection probability of each radar, optimal arrangement of radars for effective detection, and determination of the search pattern, they did not reflect the fact that most military radar sites run multiple radars in order to increase the accuracy of identifications by radars. In this paper, we propose a model to analyze the probability of identification generated by the multiple radars using non-homogeneous absorbing markov chains. Our results are expected to help the military commanders counter the enemy targets effectively by using radars in a way to maximize the identification rate of targets.

Keywords : Detection and Identification, Non-Homogeneous Absorbing Markov Chains, Radar Operation

## 1. 서 론

탐지체계는 공중 및 해상 표적에 대한 탐색 및 추적 기능을 제공한다. 표적을 탐색 및 추적하는 대표적인 장비는 회전식 RADAR(이하 R/D)이며 육군의 해안 감시체계, 공군의 조기경보체계, 해군의 함정 탐지체계 등 군 탐지체계 대부분은 회전식 R/D를 운용중이다.

탐지(Detection)는 'R/D를 이용하여 표적의 존재와 위치를 확인하는 행위'로 정의된다. 그리고 식별(Identification)은 '육상, 해상 및 공중에서 탐지된 목표물과 전자형태의 영상에서 실제 표적을 구별해내는 방법과 기술'로 정의된다[7]. 즉, 탐지된 표적이 실제 표적인지를 확인하는 것이 식별이다. 이에 따라 본 연구에서는 탐지율 및 식별률을 '특정 시점까지 표적을 탐지할 확률 및 식별할 확률'로 각각 정의한다.

탐지된 표적에 대하여 식별 절차 없이 대응(공격, 전투기 출격 등)한다면 불필요한 아군 전력의 낭비 및 우군에 대한 오인 공격 등이 발생할 수 있기 때문에 적의 공격 세력이나 종류를 식별한 후에야 대응 무기체계에 시점 등을 포함한 효과적인 대응방안을 수립할 수 있다. 하지만, 회전식 R/D의 회전 속도나 탐지확률의 차이로 인하여 탐지시점, 탐지거리, R/D 종류에 따라 식별 결과는 완벽할 수 없으며 불확실성이 존재한다. 따라서 지휘관의 의사결정은 식별률의 불확실성을 감안하여 이루어져야 한다. 예를 들어 탐지거리가 멀어서 식별률이 50~60%라면 좀 더 기다리거나 다른 탐지방안을 강구하는 것이 성급한 대응보다는 현명한 의사결정일 것이며, 식별률이 90% 이상인 경우에는 시간을 지체하기 보다는 빠른 대응을 수행하는 것이 작전의 성공가능성을 높일 것이다. 이런 맥락에서 거리별, 시간별, R/D 운용패턴에 따른 식별률은 지휘관의 의사결정에 중요한 정보임에 틀림없다.

식별의 중요성을 감안하여 식별률의 불확실성을 보완하기 위한 방법으로 군 탐지체계는 통상 2개 이상의 R/D를 운용하여 표적을 식별하고 있다. 그러

나 두 대의 R/D를 운용함으로써 개선되는 식별률에 대한 정보는 지휘관들에게 제공되지 않아, 일선 지휘관들은 개별 R/D의 탐지율을 토대로 경험칙(經驗則 : 경험을 통해 터득한 법칙)에 의해 두 대의 R/D의 식별률을 판단하여 작전에 활용하고 있다. 본 연구에서는 두 대의 R/D 운용시 식별률 변화를 비동질성 이산시간 흡수마코프체인(Non-homogeneous Discrete-time Absorbing Markov chain)을 활용하여 분석함으로써 군 지휘관이 표적에 대한 효과적인 대응방안을 수립하고 R/D 특성별 조합에 따른 최적 탐지체계를 구성하기위한 기초 정보를 제시하고자 한다.

한편, 탐지 및 식별에 관련된 기존연구는 주로 개별 R/D에 대한 탐지확률 및 최적 탐색패턴을 제시하는 것에 초점을 맞추고 있다. Koopman[8, 9]은 최초로 R/D를 이용한 표적 탐지에 대한 연구를 실시하였고 특히, 이산시간 및 연속시간 탐지에 대한 식을 제시하였다. 그리고 Kelly et al.[6]은 표적의 탐지확률을 높이기 위하여 탐지체계에서 활용되고 있는 표적 반향(Echoes) 추적 기법이 고려된 탐지확률을 제공하고 있다. 이후 Stone[13]은 정지하고 있는 표적(Stationary Target)을 찾기 위한 최적의 수색패턴을 결정하는 방법 및 표적의 탐지에 영향을 줄 수 있는 중요변수에 대한 연구를 진행했다. 또한 표적의 이동을 마코비안 이동(Markovian Motion) 및 정해진 이동(Deterministic Motion)으로 구분하여 움직이는 표적(Moving Target)에 대한 최적의 탐지패턴을 결정하는 연구를 진행했다. 이후 컴퓨터 연산능력(Computing power)의 증가 이후에는 탐지이론 및 최적화 기법 등을 이용하여 정지 및 움직이는 표적을 탐지할 수 있는 행동패턴에 대한 연구에 대한 연구가 진행되었다[8, 9, 11, 15~17].

하지만 이러한 연구는 대부분 한 개의 R/D에 의한 탐지확률만을 계산하였고 시간에 따라 전이확률이 일정한 동질성 모델(Homogeneous Model)을 활용하여 두 개의 R/D의 식별확률 계산을 위한 방법론으로는 적합하지 않다. 따라서 기존연구는 장비의 특성으로 인해 발생하는 R/D의 탐지확률이

시점, 회전수(RPM), 표적과의 거리 및 속도에 따라 변화하고 탐지가 단계형(접촉-소실-재접촉)으로 발생하여 탐지 및 식별절차를 반영하기 어려운 한계가 있다. 본 연구는 비 동질성 이산시간 흡수마코프체인(Non-homogeneous Discrete-time Absorbing Markov chain)을 활용하여 2개 이상의 R/D를 통합적으로 운용할 때의 식별확률을 계산할 수 있는 모형을 제시한다.

비 동질성 마코프체인은 사건 발생 확률이 시간에 따라(Time-dependent) 변화하는 현상을 모형화하기에 적합한 방법론이다. 즉, 시간 의존적인 변수를 모델에 반영하여 보다 현실적인 분석을 할 수 있다[4]. Feller[3]는 시간에 따라(Time-dependent) 유한한 상태에서 전이확률이 변화하는 마코프체인을 비 동질성 마코프체인(Non-homogeneous Markov chain)으로 정의하였다. 그리고 다양한 분야에서 비 동질성 마코프체인을 활용한 연구가 진행되고 있다. Ridos et al.[12]은 시간 의존 변수인 사람들의 주기적인 네트워크 사용량을 고려하여 네트워크 시스템의 신뢰도를 분석하였다. Tieling et al.[14]은 시간에 따라 수리 및 고장율이 변화한다는 현실을 반영하여 시스템의 실패율을 분석할 수 있는 모델을 제시했다. Jacques et al.[5]은 시간 의존 변수인 직원의 퇴사, 휴직 등을 고려하여 직원들의 적정 보수(Salary)를 추정하였다. Latlt et al.[10]은 시간 의존 변수인 환자 나이, 상태 등을 고려하여 비용 및 시간이 가장 많이 소요되는 진료단계를 확인하였다. 이렇듯, 비 동질성 마코프체인을 활용한 연구가 다수 존재하지만, 군사분야에 적용된 연구는 찾기 어렵다. 군사분야는 시간에 따른 상황의 변화에 어느 분야보다 민감하기 때문에 안전상태(Steady State)를 중요하게 다루는 다른 분야에 비해 일정 시간 경과 후의 운용률, 작전 성공률 등과 같은 일시상태(transient State)가 중요하게 다루어진다. 그리고 시간에 따라 전이확률이 상이한 경우(무장의 명중률 변화, 주/야간 소나의 탐지율 변화 등)가 다양하게 존재한다. 이에 따라 시간에 따라 전이확률이 상이한 다양한 군사분야에 비 동질성 마코프체

인을 활용한 연구가 활성화 될 필요가 있다.

이런 맥락에서 본 연구에서는 비 동질성 이산시간 흡수마코프체인을 활용하여 대공감시체계의 식별률을 비교적 쉽게 분석할 수 있는 모델을 제시한다. 본 연구의 목적을 달성하기 위해 제 2장에는 모델에 활용되는 방법론을 살펴보고 제 3장에서는 분석 모델을 제시한다. 제 4장에서는 분석 모델을 토대로 실제 분석결과를 통해 시사점을 살펴본다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 탐지체계 R/D의 운용특성

R/D는 전파를 이용하여 표적을 탐지, 식별하기 위하여 운용되는 장비로써 회전방식에 따라 고정식, 회전식으로 구분되며 고정식은 R/D가 회전하지 않고 지속적으로 전파를 송수신하는 형태로 표적을 지속적으로 탐지, 식별할 수 있는 장점이 있는 반면에 고가인 단점이 있다. 대표적인 예가 미국 이지스(Aegis) 함정의 SPY-1/3 R/D이다. 이에 반하여 회전식은 R/D가 일정 회전수(RPM)에 따라 회전하면서 전파를 송수신하는 형태로 표적을 탐지, 식별하며 육상 탐지체계 및 함정 등에 통상적으로 많이 운용되고 있다. 고정식에 비하여 상대적으로 저렴한 장점이 있지만 R/D가 표적의 반대쪽을 향하는 동안에 표적의 방위로 전파 송수신이 불가능하기 때문에 접촉한 표적을 손실하는 단점이 있다. 대표적인 예가 미국 및 네델란드에서 개발된 SPS-29/37과 SMART-L이다. 위에서 설명한 고정식 및 회전식 R/D의 특성을 정리하면 <표 1>과 같다.

한편, 회전식 R/D는 전파를 이용하는 장비이기 때문에 전파의 특성(회절, 굴절, 소실 등)으로 인하여 R/D 전시창(Scope)에 나타난 것이 모두 물리적 실체가 있는 실상이 아니다. 전시창에 나타난 상이 허상인지 실상인지 여부는 R/D 전시창에서 상이 지속적으로 나타나는지, 시각적으로 확인 가능한지, 열상장비와 같은 다른 수단으로도 확인이 되는지에 따라서 결정된다. 회전식 R/D는 통상적

〈표 1〉 고정식 및 회전식 R/D 특성

구분	고정식	회전식
특징	<ul style="list-style-type: none"> <li>360도 고정식 송/수신 R/D에 의한 표적탐색</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>일정 회전수에 따라 회전하는 송/수신 R/D에 의한 표적탐색</li> </ul>
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>표적 지속 탐지</li> <li>무장체계에 실시간 정보제공</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>고정식에 비해 저가 장비</li> <li>R/D 기지 및 함정에 통상적으로 운용</li> <li>고정식에 비해 정비 난이도 낮음</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>회전식에 비해 고가 장비</li> <li>회전식에 비해 정비 및 운영난이도 높음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>회전에 따른 표적 소실 발생</li> </ul>
종류	SPY-1/3	AN/SPS-49, SMART-L

으로 회전수(RPM)가 높을수록 짧은 탐지거리를 가지는 반면에 짧은 간격으로 지속적인 탐지가 가능하므로 근거리 탐지의 목적으로 운용된다. 반면, 회전수(RPM)가 낮은 회전식 R/D는 긴 탐지거리를 가지는 반면에 탐지 간격이 넓으므로 표적을 재 접촉하는 시간이 상대적으로 길어 원거리 탐지 R/D로 운용된다. 본 연구에서는 군에서 표적의 조기 탐지를 위해서 거의 대부분의 육상 R/D 기지 및 함정에 활용되고 있는 회전식 R/D를 대상으로 R/D 종류별 조합에 따른 식별 가능성에 대한 연구를 진행하였다.

개별 회전식 R/D는 회전수(RPM)에 의해 탐지, 접촉유지, 미탐지, 소실 절차를 반복하면서 표적을 탐지하게 되며, 탐지율은 R/D 출력(Power), 표적의 레이더 단면적(Radar Cross Section), 표적과의 거리 등을 고려하여 도출될 수 있다[1]. 그리고 회전식 R/D는 장비 특성으로 인해 탐지~소실 절차를 반복하므로 빠르게 접근하는 공중 접촉물(특히, 유도탄)에 대하여 실상 및 허상 여부를 신속히 확인하여 불필요한 대응 및 오인 사격을 방지하기 위하여 표적 식별이 필요하다. 또한 한 대의 회전식 R/D를 이용하여 표적에 대한 식별(지속적 탐지, 행동패턴 등)이 가능하나 두 대 이상의 회전식 R/D 운용에 비해 오히려 많은 시간이 소요된다. 이에 따라 군

탐지체계는 표적의 빠른 표적 식별을 위하여 R/D가 설치되는 장소(도서, 산, 함정 등)의 공간적 제약, 예산 등을 고려하여 통상 두 개의 R/D를 복합적으로 운용하고 있다. 두 개의 R/D에 의한 표적 식별은 두 개의 R/D에 의해서 표적을 동시에 탐지된 경우에 발생한다. 동시에 탐지된 경우 중 식별은 두 개의 R/D가 동일한 시점에 표적을 탐지한 경우와 1개의 R/D가 표적을 접촉유지하고 있는 상황에서 나머지 R/D가 표적을 탐지한 경우로 구분된다.

한편, 군 지휘관들은 적으로 식별된 표적에 대한 효과적인 무장체계 선정 및 무장체계의 성능(사거리 등)을 고려한 최적 탐지체계 구성을 위하여 두 개의 R/D 운용에 따른 식별률이 필요하다. 하지만 현재 두 개의 R/D에 의한 식별률을 분석한 자료는 지휘관에게 제공되지 않고 있는 실정이다. 이것은 두 개의 R/D에 의한 식별률이 여러 가지 요인(각 R/D의 탐지확률, 회전수 등)에 따라 결정되는 불확실성을 포함한 정보가 되어 분석하기 어렵기 때문이다. 이에 따라 일선 군 지휘관은 표적 식별을 위하여 탐지체계가 두 대의 R/D를 운용함에도 불구하고 개별 R/D의 탐지율을 토대로 경험칙에 의해 식별률을 판단하고 있는 실정이다.

본 연구는 이를 개선하기 위해 비 동질성 마코프체인을 활용하여 두 개의 R/D 운용 시 통합 식별률을 분석할 수 있는 모델 및 R/D 조합에 따른 효과를 제시했다.

## 2.2 비 동질성 흡수마코프체인 이론

흡수상태나 흡수 집단을 갖는 마코프체인을 가약 마코프체인(Reducible MC) 또는 흡수 MC(Absorbing MC)이라고 부른다[19]. 상태공간  $S = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ 에서 정의되는 마코프체인  $\{X_n, n \geq 0\}$ 을 생각하자.  $A = \{r, \dots, N-1, N\}$ 는 흡수상태들의 집합,  $A^c = \{0, 1, 2, \dots, r-1\}$ 은 일시상태들의 집합이라고 하면 전이확률이 식 (1)과 같이 구성되는 마코프체인을 흡수마코프체인이라고 한다.

$$P = \begin{bmatrix} Q & R \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (1)$$

$[ \cdot ]_{ij}$ 를 행렬의  $i$ 행  $j$ 열 원소라고 정의하면  $[Q]_{ij}$  ( $i, j \in A$ )는 일시상태(Transient State)  $i$ 에서  $j$ 로 전이할 확률을 나타내고  $[R]_{ij}$  ( $i \in A, j \in A^c$ )는 일시상태  $i$ 에서  $j$ 로 흡수될 확률을 나타낸다.

$[P_a^{(t)}]_{ij}$ 를 일시상태  $i$ 에서 시작해서  $t$ ( $t$  slots)번 만에  $j$ 로 흡수 될 확률로 정의하면 마지막 전이에 조건을 걸어서 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$[P_a^{(t)}]_{ij} = \sum_{k=1}^r [Q^{t-1}]_{ik} [R]_{kj} \quad (2)$$

비 동질성 흡수마코프체인은 시간에 의존(Time-dependent)하여 유한한 상태(State)에서 전이확률이 변화하는 형태이므로  $t$ 시점별로 상이한 흡수마코프체인을 구성한다. 그리고 비 동질성 흡수마코프체인은 매 시점별로 전이확률이 상이하므로  $Q_t, R_t$ 을  $t$ 시점의 일시상태 사이의 전이확률 행렬 및 일시상태에서 흡수상태로 전이할 확률 행렬이라고 정의하면 식 (2)는 다음과 같이 변화된다[18].

$$[P_a^{(t)}]_{ij} = Q_1 \cdot Q_2 \cdots Q_{t-1} \cdot R_t \quad (3)$$

### 3. 감시체계 식별률 분석 모델

#### 3.1 모델의 개요 및 가정 사항

본 연구의 감시체계 식별률 분석모델은 특정 표적에 대하여 특성(탐지확률, 회전수 등)이 상이한 2개의 R/D로 표적을 탐지할 때 표적에 대한 시점별 식별률을 제시하는 모델로써 모델의 기본 가정 및 제약은 다음과 같다.

첫째, 각 군에서 통상적으로 운용되고 있는 2개의 회전식 R/D에 대하여 분석을 실시한다.

둘째, 탐지 대상은 공중 표적(특히, 유도탄)이며 표적은 관측자 방향으로 특정속도로 지속적으로 접

근한다.

셋째, 분석은 표적의 최초 탐지부터 소실될 때까지이며 표적이 관측자의 위치에 도착하면 소실로 간주하여 분석을 종료한다.

넷째, 관측자는 사전에 표적(항공기, 유도탄)에 대한 개별 R/D의 거리대별 탐지율을 알고 있다.

다섯째, R/D는 운용 중에 고장이 발생하지 않는다.

여섯째, 대공 R/D가 설치된 지역의 구조물(건물, 함정 선체, 산 등)에 의해 발생하는 음영각(Shadow angel), 음영구역(Shadow region)은 고려하지 않는다.

본 연구의 분석모델은 다음과 같은 기호로 표현한다.

#### <Notations>

$L$  : 탐지 시점 집합

$K$  : 표적 도달 시간

$d_{1i}$  :  $i$ 시점의 첫 번째 R/D 탐지확률

$d_{2i}$  :  $i$ 시점의 두 번째 R/D 탐지확률

$r_1$  : 첫 번째 R/D의 탐지 주기

$r_2$  : 두 번째 R/D의 탐지 주기

$c$  :  $r_1, r_2$ 의 최소 공배수

$s$  : R/D가 표적을 탐지한 후 지속적으로 탐지 상태를 유지할 확률

$P_i$  :  $i$ 시점의 전이율 행렬

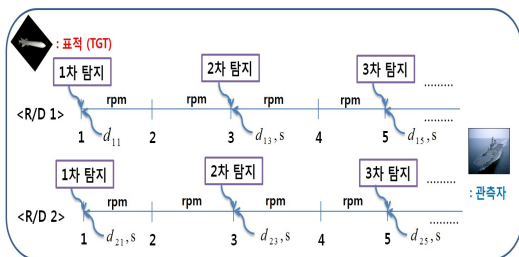
각 R/D은 회전수( $r_1, r_2$ )에 따라 탐지시점( $L$ )이 결정되고 시점별 탐지확률( $d_{1i}, d_{2i}$ )을 가진다. 예로 표적이 관측자에게 도달하는 시간( $K$ )이 100초이고 첫 번째 R/D의 회전수( $r_1$ )를 3으로 가정한다면, 3, 6, 9, ..., 99가 탐지시점이 된다. 그리고 이외의 시점은 첫 번째 R/D 의해 탐지가 일어나지 않는다. 그리고 첫 번째 R/D가 탐지시점( $L$ )에서 표적을 탐지한다면 다음 탐지시점까지 표적의 반향을 이용해 확률  $s$ 로 접촉을 유지한다. 이러한 개념은 두 번째 R/D에도 동일하게 적용할 수 있으며 2개의 R/D에 의해 동시에 탐지가 일어나는 시점은 2개 R/D의 최소 공배수( $c$ ) 시점에서 동일한 표적을 탐지할 수

있다. 예로, R/D 1, 2의 회전수( $r_1, r_2$ )를 각각 3, 2으로 가정한다면, 6, 12, 18, ...,  $6 \cdot n$ , ( $6 \cdot n \leq K$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ )시점에서 R/D 1, 2에 의해 동시 탐지가 가능하다.

식별은 두 개의 R/D에 의해서 표적이 탐지된 경우에 발생한다. 두 개의 R/D가 동일한 시점에 동시에 표적을 탐지한 경우와 한 개의 R/D에 의해서 표적을 탐지한 후 탐지를 유지(s)한 상태에서 다른 R/D에 의해 그 표적을 탐지하면 표적을 식별하게 되는 것이다.

### 3.2 분석모델

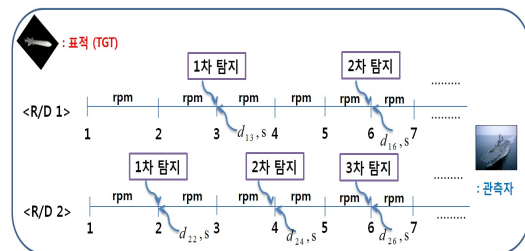
대공 감시체계는 통상 R/D의 특성이 상이한 복수의 R/D를 운용하는 특성을 고려하여 본 연구에서는 대공감시체계 분석모델을 두 개의 경우(Case)로 구분하여 분석한다. Case 1은 두 개의 R/D가 동일한 회전수(RPM)로 회전(Homogeneous time frame)하면서 시점별로 상이한 탐지확률(Non-homogeneous detection probability)을 가지는 경우로서 [그림 1]과 같다. [그림 1]과 같이 시점 1에  $d_{11}, d_{21}$ 의 탐지확률로 탐지가 발생하고 시점 2에는 탐지가 일어나지 않음을 알 수 있다. 그리고 동일한 시점(1, 3, 5, ...,  $K$ )에 탐지가 동시에 일어나는 개념이다.



[그림 1] Case 1 개념도

Case 2는 두 개의 R/D가 상이한 회전수로 회전(Non-homogeneous time frame)하면서 시점별로 상이한 탐지확률(Non-homogeneous detection probability)을 가지는 경우로서 [그림 2]와 같다. 2개

의 R/D가 각각 상이한 시점에 탐지가 일어나는 경우이다. R/D 1은 탐지가 시점(3, 6, 9, ...,  $3n$ , ( $3n \leq K$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ))에서 탐지가 일어나고, R/D 2는 탐지가 시점(2, 4, ...,  $2n$ , ( $2n \leq K$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ))에서 탐지가 일어난다. 그리고 R/D 1, 2의 공배수 시점(6, 12, ...,  $6n$ , ( $6n \leq K$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ))에서 동시에 탐지가 발생한다. 위에서 언급한 이외의 시점에서는 탐지가 발생하지 않는다.



[그림 2] Case 2 개념도

#### 3.2.1 전이행렬 $P_i$

분석모델을 구성하기 위한 전이행렬의 상태(State) 정의는 <표 2>와 같다. 상태 0은 두 개의 R/D가 표적을 미 탐지하지 못한 상태이며 상태 1, 1'는 두 개의 R/D 중 한 개의 R/D가 표적을 탐지한 경우로 첫 번째 R/D 또는 두 번째 R/D만 표적을 탐지한 경우이다. 상태 2는 표적이 2개의 R/D에 의해 탐지되어 식별(흡수)된 상태이다.

<표 2> 전이행렬 상태 정의

상태	설명
0	2개의 R/D에 의해 표적 미 탐지된 상태
1	첫 번째 R/D에 의해 표적의 탐지가 일어난 상태
1'	두 번째 R/D에 의해 표적의 탐지가 일어난 상태
2	2개의 R/D에 의해 표적이 동시에 탐지되어 흡수된 상태(식별)

Case 1의 첫 번째, 두 번째 R/D에 의해서 동시에 탐지가 일어나는 전이행렬은 식 (4)와 같다. 동시 탐지는 첫 번째 및 두 번째 R/D의 최소 공배수( $c$ )마다 발생한다.

$$P_i =$$

	0	1	1'	2
0		$d_{1i}(1-d_{2i})$	$(1-d_{2i})d_{2i}$	$d_{1i}d_{2i}$
1	$(1-s)(1-d_{2i})$		$(1-s)d_{2i}$	$s \cdot d_{2i}$
1'	$(1-s)(1-d_{1i})$	$(1-s)d_{1i}$		$s \cdot d_{1i}$
2	0	0	0	1

(4)

표적을 탐지하지 않은 상태 0에서 첫 번째 R/D에 의해 표적이 탐지된 상태 1로 전이하는 경우는 첫 번째 R/D만이 표적을 탐지하는 경우이다. 이것은  $i$ 시점에서 R/D 1은 탐지확률  $d_{1i}$ 로 탐지가 되고 R/D 2는  $1-d_{2i}$ 의 확률로 탐지가 실패하는 경우에 전이가 발생한다. 그리고 상태 1에서 상태 0로의 전이는 접촉유지 중이던 표적을  $1-s$ 의 확률로 소실하고 이때 두 번째 R/D는 탐지를 못하는 경우에 일어난다. 상태 0에서 2개의 R/D에 의해 표적이 동시에 접촉되면 상태 2(식별)로 전이가 일어나고 상태 2는 흡수상태이다. 이때 전이확률은  $d_{1i} \cdot d_{2i}$ 이다.

Case 2는 첫 번째, 두 번째 R/D의 회전수가 다르므로 Case 1의 2개의 R/D가 동시에 일어나는 전이행렬 이외에 각각 R/D에 의해 탐지가 일어나는 전이행렬이 추가적으로 구성된다.

먼저, 첫 번째 R/D에 의해서만 탐지가 일어나는 전이행렬은 식 (5)와 같다. 탐지는 첫 번째 R/D 회전수의 배수로 발생하고 이때, 두 번째 R/D와 동시에 탐지가 일어나는 최소 공배수( $c$ ) 시점은 제외된다.

$$P_i =$$

	0	1	1'	2
0		$d_{1i}$	0	0
1	$1-s$		0	0
1'	0	0		$s \cdot d_{1i}$
2	0	0	0	1

(5)

상태 1'에서 상태 2로의 전이는 두 번째 R/D가 표적을 탐지한 상태에서 첫 번째 R/D가 탐지한 경

우로 전이율은  $s \cdot d_{1i}$ 이다. 그리고 상태 1에서 상태 0으로의 전이는 접촉 중이던 표적을 소실한 경우이다.

두 번째 R/D에 의해서만 탐지가 일어나는 전이행렬은 식 (6)과 같다. 탐지는 두 번째 R/D 회전수의 배수로 발생하고 이때, 첫 번째 R/D와 동시에 탐지가 일어나는 공배수( $c$ ) 시점은 제외된다.

$$P_i =$$

	0	1	1'	2
0		0	$d_{2i}$	0
1	0		0	$s \cdot d_{2i}$
1'	$1-s$	0		0
2	0	0	0	1

(6)

식 (6)은 첫 번째 R/D에 의해서만 탐지가 일어나는 식 (5)와 유사함을 알 수 있다. 상태 1에서 상태 2로의 전이는 첫 번째 R/D가 표적을 탐지한 상태에서 두 번째 R/D가 탐지한 경우로 전이율은  $s \cdot d_{2i}$ 이다. 그리고 상태 1에서 상태 0으로의 전이는 두 번째 R/D에서 접촉 중이던 표적을 소실한 경우이다. 한편, 첫 번째, 두 번째 R/D에 의해 동시에 표적을 탐지하는 전이행렬은 Case 1의 식 (4)와 동일하다.

### 3.2.2 성능척도

탐지체계 분석 모형의 성능 척도는 두 대의 R/D에 의해 표적을 식별될 때까지  $t$ 시간이 걸릴 확률,  $p_t$ 이다.  $Q_1 \cdot Q_2 \dots Q_{t-1}$ 은  $t$ 시점까지 식별은 되지 않고 탐지만 발생하는 일시상태의 전이행렬이며  $R_t$ 는  $t$ 시점에 식별되어 흡수되는 전이행렬이다. 그리고 상태 변화(탐지, 식별)가 발생하지 않는 시점의 전이확률행렬은 단위행렬(Identity Matrix)이므로  $p_t$ 은 식 (7)과 같다. 그리고 상태 0에서 시작하므로 초기 확률 벡터  $\alpha$ 는(1, 0, 0)이 된다.

$$p_t = \alpha \cdot P_a^{(t)} \quad (7)$$

(단,  $\alpha = (1, 0, 0)$ )

## 4. 수치실험 및 결과분석

### 4.1 실험조건

본 연구 실험은 실제 자료로 분석가능하나 군사 정보의 특성상 가상의 자료로 분석하였다. 하지만 R/D의 특징을 최대한 고려하여 의미있는 결과를 얻을 수 있는 모수 값을 사용했다.

R/D는 운용 특성에 따라 장/중/단거리 R/D로 구분된다. 장거리 R/D의 경우 원거리에서 탐지확률이 높은 반면에 근거리에서 낮은 탐지확률을 가진다. 반대로 근거리 R/D의 경우 근거리에서 탐지확률이 높은 반면에 원거리에서는 낮은 탐지확률을 가진다. 이러한 특성을 고려하여 <표 3>과 같이 R/D 1, 2, 3에 근거리, 중거리, 장거리 R/D의 특성을 반영토록 모수 값을 설정하였다. 그리고 군 탐지체계는 표적의 효과적인 탐지를 위하여 장/중/단거리 R/D를 복합적으로 운용하고 있는 현실을 반영하여 2개의 R/D를 조합했을 경우의 식별률을 분석하였다. 또한 2개 R/D의 회전수가 동일한 경우와 상이한 경우를 구분하여 식별률을 비교/분석하였다. 수치실험은 Matlab을 활용하였다.

<표 3> R/D의 거리대별 탐지확률

구 분	모수 값			
	탐지시점	100~50 (최대)	50~20 (유효)	20~1 (최소)
R/D 1 (단거리)	탐지시점	100~50 (최대)	50~20 (유효)	20~1 (최소)
	탐지확률	0.1	0.3	0.6
R/D 2 (중거리)	탐지시점	100~50 (최대)	50~20 (유효)	20~1 (최소)
	탐지확률	0.3	0.5	0.4
R/D 3 (장거리)	탐지시점	100~50 (최대)	50~20 (유효)	20~1 (최소)
	탐지확률	0.6	0.4	0.1

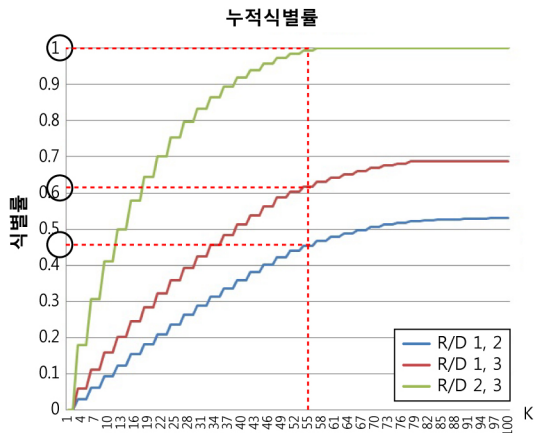
### 4.2 실험 결과 및 분석

#### 4.2.1 Case 1(회전수가 동일한 R/D)

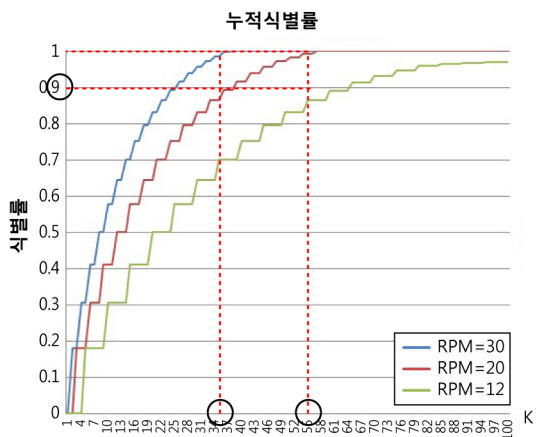
Case 1은 탐지시점 별 탐지확률은 다르지만 동일한 회전수(RPM)로 탐지하는 경우이다. R/D 회

전수 및 R/D 조합에 따라 여러 가지 경우가 존재하지만 본 연구에서는 대표적인 분석결과를 요약하여 제시한다. 먼저, K(표적 도달시간)이 100, R/D 회전수가 20일 경우 각 R/D를 조합하여 식별률을 분석하였으며 분석결과는 [그림 3]과 같다. 분석결과와 식별률은 표적 도달시간(K)까지의 누적 식별률을 의미한다(이하 동일).

R/D 회전수가 20일 경우 R/D 2, 3의 조합이 가장 높은 식별률을 나타냄을 알 수 있으며 탐지시점 55에서 표적을 100% 식별함을 알 수 있다. 그리고 R/D 1, 2의 조합은 탐지시점 55에서 표적을 45% 식별함을 알 수 있다.



[그림 3] R/D 조합에 따른 식별률(RPM = 20)



[그림 4] R/D 2, 3의 식별률(RPM = 30, 20, 12)

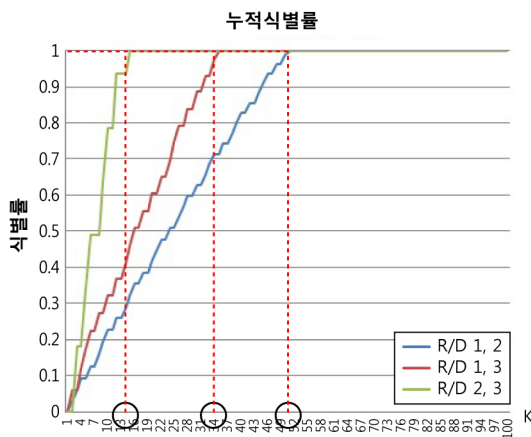


[그림 4]는 R/D 2, 3 조합의 회전수에 따른 식별률을 분석한 결과이다. 회전수가 높을수록 탐지 기회가 증가하므로 식별률이 높음을 알 수 있다. 회전수가 30인 경우 탐지시점 36에서 표적을 100% 식별함을 알 수 있고, 회전수가 12인 경우 탐지시점 55에서 표적을 89% 식별함을 알 수 있다.

#### 4.2.2 Case 2(회전수가 상이한 R/D)

R/D 1, 2, 3의 회전수가 상이한 경우의 식별률을 분석하였다. <표 2>에서 고려한 시점별 탐지확률을 고려하여 R/D 1, 2, 3의 회전수를 각각 30, 20, 12로 가정하여 분석하였다. 회전수가 높을수록 근거리에서 높은 탐지확률을 가지고 회전수가 낮을수록 원거리에서 높은 탐지확률을 가지는 특성을 고려하였다. 그리고 표적 도달시간(K)을 100, 50, 20으로 구분하여 분석하였다. 이것은 K(표적 도달시간)이 적군(Enemy : 표적 발사체, 기지 등)과 탐지체계간의 거리에 따라 결정되는 현실을 묘사하기 위해서이다.

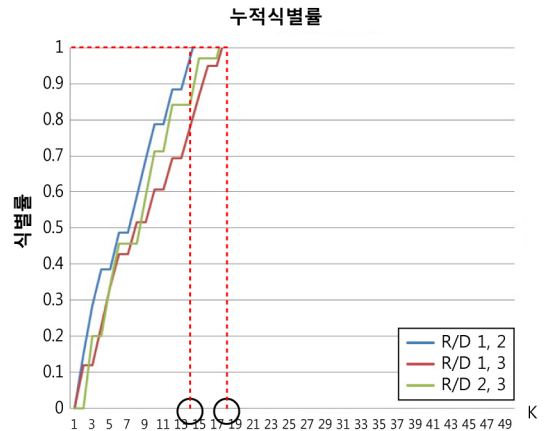
표적 도달시간(K)이 100인 경우의 분석결과는 [그림 5]와 같으며 R/D 2, 3 즉, 중/장거리 R/D의 조합이 표적을 조기에 식별할 가능성이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 그리고 R/D 2, 3 조합의 경우 탐지시점 14에서 표적을 100% 식별함을 알 수 있다. 이것은 탐지시점 14에는 무장체계에 표적 정보를 100% 제공 가능함을 알 수 있다. R/D 1, 3 및



[그림 5] 표적 도달시간(K) 100

R/D 1, 2 조합의 경우 탐지시점 34 및 51에서 표적을 100% 식별하여 무장체계에 정보를 제공할 수 있음을 알 수 있다.

표적 도달시간(K)이 50인 경우의 분석 결과는 [그림 6]과 같다. K가 100인 경우와 달리 중/단거리 R/D 1, 2의 조합이 상대적으로 표적을 조기에 식별할 가능성 가장 높은 것을 알 수 있다. 그리고 R/D 1, 2 조합의 경우 탐지시점 14에서 표적을 100% 식별함을 알 수 있다. 하지만, R/D 1, 2의 조합이 식별률 100%를 도달하는 시점은 R/D 1, 3 및 R/D 2, 3의 도달시점(시점 18)과 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

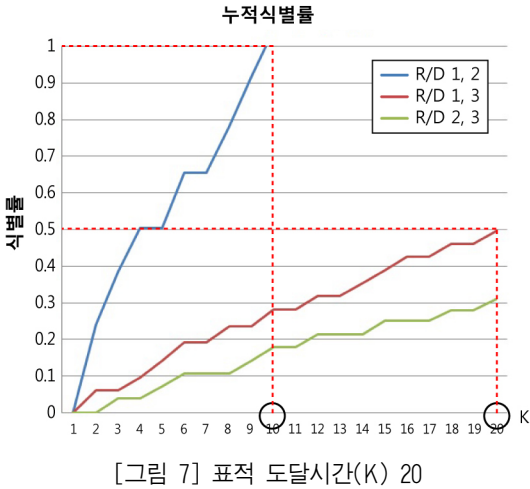


[그림 6] 표적 도달시간(K) 50

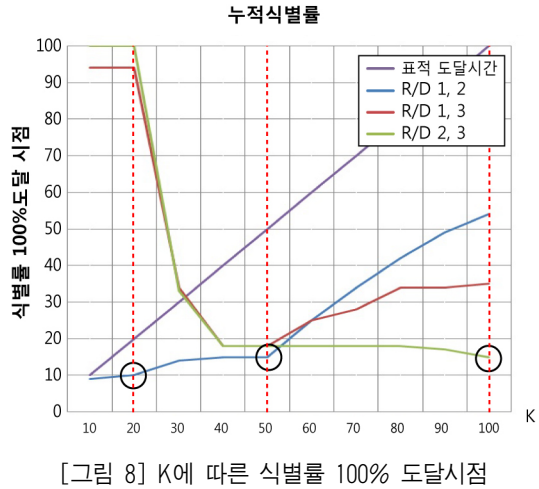
표적 도달시간(K)이 20인 경우의 분석결과는 [그림 7]과 같다. 중/단거리 R/D 1, 2의 조합이 상대적으로 표적을 조기에 식별할 가능성이 가장 높은 것을 알 수 있다. 그리고 탐지 시점 10에서 표적을 100% 식별함을 알 수 있다. 반면에 R/D 1, 3 및 R/D 2, 3의 식별률은 최종 시점까지 50% 및 31%를 나타냄을 알 수 있다.

이를 통해 탐지 물체의 거리에 따라서 R/D의 최적 조합이 달라지므로 상황에 따른 판단이 필요함을 알 수 있다.

한편, 지금까지의 분석은 탐지체계와 적의 공격 시점 및 거리가 고정적인 상황을 가정하여 분석하



[그림 7] 표적 도달시간(K) 20



[그림 8] K에 따른 식별률 100% 도달시점

였지만, 이는 상황에 따라 변화할 수 있다. 해군 함정(탐지체계)이 이동함에 따라 적군(Enemy : 표적 발사체, 기지 등)과의 거리는 변화할 수 있기 때문이다. 그리고 함정의 R/D는 운용 방식(Mode)에 따라 단일 R/D가 장/중/단거리 특성을 갖도록 거리 대별 탐지확률 조정이 일정 부분 가능하여 두 개의 R/D로 다양한 조합이 가능하다. 이에 따라 함정 지휘관은 표적의 빠른 식별을 위하여 표적 도달시간(K)의 변화에 따라 수시로 R/D 최적 조합 판단이 요구된다. 따라서 식별률이 100%에 도달할 때까지 시점을 분석한 결과는 함정 지휘관의 표적 도달시간(K)의 변화에 따른 R/D의 최적 조합 의사결정에 유용하게 활용될 수 있다. 표적 도달시간(K)에 따른 식별률이 100%에 도달한 시점을 분석한 결과는 [그림 8]과 같다. [그림 8]의 표적 도달시간 직선은 표적의 속도를 1000m/s로 가정했을 때의 표적 도달시간을 의미하며 이를 기준으로 각 R/D 조합의 유용성을 보다 쉽게 확인할 수 있다. 예로, 표적 도달시간이 20일 경우 중/장거리 R/D 1, 3 및 단/장거리 R/D 2, 3은 직선의 윗면(표적 식별 시간 > 표적 도달시간)에 위치하여 아랫면에(표적 식별 시간 < 표적 도달시간)에 위치한 단/중거리 R/D 1, 2에 비해 유용하지 않음을 알 수 있다. 그리고 표적 도달시간이 50일 경우 모든 R/D 조합이 직선의 아랫면에 위치하고 표적 식별 시간

이 유사하여 모든 조합이 유용함을 알 수 있다. 또한 표적 도달시간이 100일 경우 모든 R/D 조합이 직선의 아랫면에 위치하지만 차이가 가장 큰 중/장거리 R/D 2, 3의 조합이 가장 유용함을 알 수 있다. [그림 8]의 분석결과에 따라서 표적의 조기 식별을 위하여 지휘관은 표적 도달시간(K) 100~80일 경우는 중/장거리 특성을 갖도록 두 R/D의 탐지확률을 조정하고, 50 이하일 경우는 중/단거리 특성을 갖도록 R/D의 탐지확률을 조정하여 탐지체계를 운용할 수 있다.

#### 4.3 식별률 분석의 시사점

본 연구의 분석결과를 통하여 군 지휘관은 R/D의 조합에 따른 시점별 식별률 자료를 획득 가능함에 따라 목표 식별률을 고려하여 최적의 R/D의 조합을 결정할 수 있다. 예로, 표적 도달시간(K)이 100인 경우 탐지시점 20까지 표적을 100%로 목표 식별률을 설정한다면 [그림 5]에 의해 R/D 2, 3이 14시점에 표적을 100% 식별하므로 최적의 조합일 것이다. 또한 표적의 식별 정보를 바탕으로 군 지휘관은 현재 보유중인 무장체계가 표적에 대하여 최초로 공격을 할 수 있는 시점을 판단할 수 있다. 최초 공격 가능시점은 주요 목표(수도, 군사시설 등)를 향해 접근하는 표적에 대하여 공격 가능 회수

등을 결정하는 중요 자료이며 이를 통하여 특정 표적에 대한 최종 요격 성공률 및 생존률 등과 같은 무장체계의 성능을 결정하는 척도를 산출할 수 있다. 그리고 도출된 성능척도를 이용하여 표적에 대한 무장 할당 등과 같은 효과적인 대응 계획을 수립할 수 있다. 또한, 현재 무장체계의 성능을 최대한 발휘할 수 있는 시점별 식별률을 충족시킬 수 있는 복수 R/D의 조합을 결정할 수 있으며 반대로 현재의 복수 R/D의 시점별 식별률을 바탕으로 최적의 무장체계를 선정할 수도 있다. 예로 군 지휘관이 어떤 체계(System)의 탐지체계와 무장체계의 소요 및 성능을 결정해야 한다고 가정하자. 만약 무장체계가 00시점에서부터 공격이 가능하다면 무장체계의 성능을 효과적으로 운용하기 위해서 군 지휘관은 00시점에 표적을 100% 식별 가능한 탐지체계를 선정해야 할 것이다. 그리고 탐지체계가 식별한 표적을 신속하게 대응하기 위하여 식별 시점에 공격이 가능한 무장체계 선정해야 할 것이다.

따라서 연구의 분석결과는 탐지 및 무장체계의 R/D 및 무장 소요를 결정하는 중요한 근거자료로 활용 가능할 것이다.

## 5. 결론 및 향후 연구과제

현재 군 탐지체계는 개별 회전식 R/D에 의한 표적의 탐지를 자료만을 보유하고 있다. 하지만, 지휘관들은 허위 표적(허상)에 대한 불필요한 대응 및 오인사격을 방지하고 표적에 대하여 효과적인 대응 방안 수립 및 R/D 특성별 조합에 따른 최적 탐지체계를 구성하기 위하여 경험칙에 의해서가 아닌 두 개의 R/D 운용에 따른 객관적 식별률 파악이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 비 동질성 흡수 마코프체인(Non-homogeneous Markov chains)을 활용하여 시점별 식별률을 보다 쉽게 분석할 수 있는 방법론을 제시하였다.

특히, 군사분야가 시간에 따른 상황 변화에 어느 분야보다 민감하다는 사실을 고려할 때, 시간에 따라

(Time-dependent) 동적(Dynamic)으로 변화하는 현상을 모형화하기 적합한 비 동질성 흡수마코프체인은 군사분야에 다양하게 활용될 가능성이 높다. 하지만 현재까지 군사분야에 비동질성 흡수마코프체인을 활용한 연구는 미흡하다. 이러한 맥락에서 본 연구는 향후 다양한 군사 분야에 비동질성 흡수 마코프체인의 활용 가능성을 제시하였다는 점에 의의가 있다.

그리고 특정 표적에 대한 복수 R/D의 시점별 식별률을 제공함으로써 군 지휘관이 효과적인 무장체계 운용 및 무장 소요의 근거자료를 제공할 수 있다는 점에 실무적 의의가 있다. 또한 특성이 상이한 R/D를 복수로 배치할 때 식별률을 최대로 할 수 있는 최적의 조합 소요를 결정할 수 있을 것이다.

한편, 본 연구는 회전식 R/D에 의하여 연구를 진행하였지만 방법론을 연속시간 마코프체인으로 바꾼다면 고정식 R/D도 유사한 방식으로 분석 가능할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Chang, J.S., Radar Engineering, Bo Seoung Mun Wah Company, 1997.
- [2] Eagle, J.N., "Optimal Search for a Moving Target When the Search Path is Constrained," *Operations Research*, Vol.32(1984), pp.1107-1115.
- [3] Feller, W., An introduction to Probability Theory and its Applications, Wiley, New York, 1970.
- [4] Garg, S.K., G. Marshall, H.P. Chase, W.E. Jackson, P. Archer, and M.J. Crews, "The use of the Markov process in describing the Natural Course of Diabetic Retinopathy," *Arch Ophthalmol*, Vol.108(1990), pp.1245-1247.
- [5] Jacques, J. and M. Raimondo, "Salary Cost Evaluation by Means of Non-Homogeneous Semi-Markov Processes," *Stochastic Models*,

- Vol.18(2002), pp.7-23.
- [6] Kelly, E.J., I.S. Reed, and W.L. Root, "The Detection of Radar Echoes in Noise," *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol.8(1960), pp.481-507.
- [7] Kim, C.Y., G.R. Min, S.T. Ha, S.J. Kang, S. C. Choi, S.Y. Choi, and J.Y. Lee, *Military Operations Research Theory and Applications*, Doo Nam, 2004.
- [8] Koopman, B.O., "The Theory of Search, Pt. III. The Optimum Distribution of Searching Effort," *Operations Research*, Vol.5(1957), pp.613-626.
- [9] Koopman, B.O., "The Theory of Search, Pt. I. Kinematic Bases," *Operations Research*, Vol.4(1956), pp.324-346.
- [10] Lalit, G. and M. Sally, "Non-homogeneous Markov models for sequential pattern mining of healthcare data," *Journal of Management Mathematics*, Vol.20(2009), pp.327-344.
- [11] Mangel, M., "Search for a Randomly Moving Object," *SIAM J. Appl. Math*, Vol.40(1981), pp.327-338.
- [12] Rindos, A., S. Woollet, I. Viniotis, and K. Trivedi, *Exact Methods for the Transient Analysis of Non-homogeneous Continuous Time Markov chains*, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [13] Stone, L.D. and J.B. Kadane, "Optimal Whereabouts Search for a Moving Target," *Operations Research*, Vol.29(1981), pp.1154-1166.
- [14] Tieling, Z. and H. Michio, "Availability and Reliability of System With Dependent Components and Time-Varying Failure and Repair Rates," *Transactions on Reliability*, Vol.50(2001), pp.151-158.
- [15] Tierney, L. and J.B. Kadane, "Surveillance Search for a Moving Target," *Operations Research*, Vol.31(1983), pp.720-738.
- [16] Trummel, K.E. and J.R. Weisinger, "The Complexity of the Optimal Searcher Path Problem," *Operations Research*, Vol.34(1986), pp.324-327.
- [17] Washburn, A.R., "Search for a Moving Target : The FAB Algorithm," *Operations Research*, Vol.31(1983), pp.739-751.
- [18] Yoon, B.K., "Phase-type Stochastic Process and its Application in Defense Area," *Journal of Defense Science and Technology*, Vol.1(2008), pp.14-26.
- [19] Yoon, B.K., *Markovian Arrival Process and its Application in Defense Area*, Research Institute for National Security Affairs, 2010.