

## Job Shop 스케줄링 이론을 이용한 함정용 다기능 레이다 빔 스케줄링

### Beam Scheduling for Shipborne Multi-Function Radar Based on Job Shop Scheduling Theory

정남훈 · 진승현 · 최재호 · 김철호\* · 김경태

Nam-Hoon Jeong · Seung-Hyeon Jin · Jae-Ho Choi · Cheol-Ho Kim\* · Kyung-Tae Kim

#### 요 약

빔 스케줄링은 다기능 레이다(multifunction radar: MFR)가 할당된 다수의 임무를 수행하면서 레이다 자원을 효율적으로 관리하기 위해 필요한 기능이다. 본 논문에서는 이러한 빔 스케줄링 문제를 job shop 스케줄링 문제의 개념을 도입하여 접근하고, 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 MFR이 빔을 합리적으로 할당할 수 있도록 계획을 수립하였다. 시뮬레이션에서는 MFR의 실제 운용을 고려하여 프레임 시간, 총 가중 지연시간, 드랍아웃(drop-out) 표적 수의 다양한 측면에서 표적 수에 따른 각 알고리즘의 스케줄링 결과를 분석하여 성능 비교를 수행하였다. 그 결과, 해상 환경에서 다수의 표적에 대한 빔 스케줄링 시 Apparent Tardiness Cost(ATC) 및 Weighted Modified Due Date(WMDD) 알고리즘이 효율적임을 확인하였다.

#### Abstract

Beam scheduling is necessary for a multifunction radar(MFR) to perform multiple tasks and manage the resources of the radar efficiently. In this paper, we introduce the concept of the job shop problem to solve the beam-scheduling problem, and apply heuristic algorithms to enable reasonable beam allocation by the MFR. Then, we select three indicators, frame time, total weighed tardiness, and the number of targets dropped out, by considering realistic operation of the MFR. Based on the simulation results, we analyze the scheduling of each algorithm according to the number of targets and compare the performance of the algorithms.

Key words: Multifunction Radar, Radar Resource Management, Beam Scheduling, Job Shop Problem, Total Weighted Tardiness

#### I. 서 론

오늘날의 위상배열 레이다는 전자주사 방식으로 인하

여 과거의 기계식 조향 방식에 비해 빔 조향 시간이 매우 짧으며, 이는 레이다 신호처리 기술의 발전과 더불어 단일 레이다 임무에 대한 처리 시간을 비약적으로 감소시

「본 연구는 국방과학연구소의 지원(계약번호: UD170005DD)을 받아 수행하였습니다(This work has been supported by Agency for Defense Development (ADD) of Republic of Korea under Project No.UD170005DD.)」

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology)

\*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received July 8, 2019 ; Revised July 24, 2019 ; Accepted July 24, 2019. (ID No. 20190708-063)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

킬 수 있는 계기가 되었다. 또한, 이로 인하여 하나의 레이더만으로 다수의 레이더 임무를 수행하기에 충분한 시간을 확보할 수 있게 되었고, 최근에는 단일 레이더가 영역 감시 및 탐지, 다중 표적 추적, 표적 식별, 미사일 유도 등 여러 임무를 수행하는 다기능 레이더(multifunction radar: MFR)가 개발되어 항공기, 함정과 같은 다양한 형태의 플랫폼에 탑재되고 있다. 그러나 이러한 플랫폼에서는 레이더에 투입할 수 있는 시간, 전력 등의 자원이 한정적이며, 따라서 레이더 자원을 효율적으로 운용하기 위한 레이더 자원 관리(radar resource management: RRM) 기술이 중요하다<sup>[1]</sup>. 특히, 넓은 해상 영역을 감시하고 해당 영역에 존재하는 다수의 표적에 대한 추적을 수행하는 함정용 MFR의 경우, 탐색 임무와 다중 표적 추적 임무 측면에서의 자원 관리가 필수적이다.

함정용 MFR의 자원 관리는 크게 표적 우선순위 할당과 빔 스케줄링으로 구분할 수 있다. 표적 우선순위 할당은 수집된 정보로부터 각 표적에 대한 레이더의 우선순위를 결정하는 과정으로, 퍼지 논리 기반 알고리즘<sup>[2]</sup>, 동적 계획법 기반 알고리즘<sup>[3]</sup>, 인공 신경망 기반 알고리즘<sup>[4]</sup> 등이 개발되어 있다. 또한, 빔 스케줄링은 표적 우선순위 할당 알고리즘으로부터 얻어진 각 표적의 우선순위를 바탕으로 탐색 및 추적 빔을 시간적으로 적절하게 할당하는 과정이다. 이러한 빔 스케줄링은 기존의 최적화 문제 중 job shop 스케줄링 문제<sup>[5]</sup>의 개념을 도입하여 접근할 수 있으며, job shop 스케줄링에 이용되는 휴리스틱 알고리즘을 적용할 수 있다. 휴리스틱 알고리즘의 경우 전역 최적해를 구하는 방식과 비교하여 계산 요구량이 매우 낮으며, 항공기, 대함 미사일 등 속력이 빠른 표적에 대한 빔 스케줄링이 실시간으로 이루어져야 하는 전술 상황에서의 다기능 레이더 운용에 적합하다. 그러나 빔 스케줄링에 job shop 스케줄링 이론을 적용할 시 함정용 MFR의 탐색 및 추적 임무 특성과 전술 상황에 대한 고려가 수반되어야 한다. 또한, 현재 빔 스케줄링에 대한 여러 휴리스틱 알고리즘의 구체적인 적용 방법 및 적용 가능성 검토와 더불어 다기능 레이더 운용 측면에서의 성능 평가에 대한 연구가 부족하다.

본 논문에서는 해상 환경에서 탐색 및 추적 임무를 수행하는 함정용 MFR을 모델링하고, Weighted Earliest Due Date(WEDD), Weighted Modified Due Date(WMDD), Mi-

nimum Stack(MS), Apparent Tardiness Cost(ATC)의 네 가지 휴리스틱 알고리즘에 대해 적용 가능성을 검토하였다. 또한, 다수의 표적이 출현하는 전술 상황 시나리오를 기반으로 빔 스케줄링 시뮬레이션을 수행하였으며, 기존에 MFR의 임무 스케줄링 성능 분석을 위해 이용되었던 총 가중 지연 시간(total weighted tardiness: TWT)<sup>[6,7]</sup>과 더불어 MFR의 실제 운용 상황을 더 효과적으로 반영할 수 있도록 프레임 시간(frame time), 표적의 드랍아웃(drop-out)을 새로이 고려하여 각 알고리즘의 성능을 비교 및 분석하였다.

## II. 본 론

### 2-1 함정용 다기능 레이더 모델링

함정용 MFR은 전함 등에 탑재되어 평소에는 주변 해상 영역의 전 방위로 탐색 빔을 스캔하는 감시 모드로 동작하고, 표적이 탐지되는 경우 즉시 추적 모드로 돌입하여 해당 표적에 대한 추적과 감시 임무를 동시에 수행한다. 이렇게 감시 및 추적 모드가 동시에 동작하는 과정에서 레이더 자원을 효율적으로 할당하기 위하여 우선순위 할당 및 빔 스케줄링이 이루어져야 하며, MFR의 구체적인 동작 흐름은 그림 1에 나타나 있다.

함정용 MFR의 초기 구동 시 전 방위를 2회 스캔하여 주변 표적의 거리 및 속력, 고각 및 방위각 정보를 얻는다. 탐색 빔은 방위각 방향 3 dB 빔 폭이 2°, 고각 방향 빔 폭이 30°로 넓은 빔을 이용하며, 이 탐색 빔을 방위각 방향으로 2°씩 이동시키며, 전 방위를 스캔함으로써 감시 임무를 수

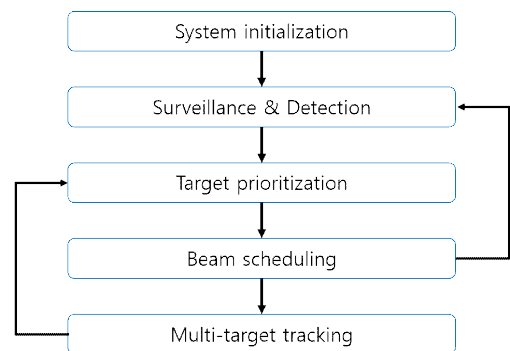


그림 1. 함정용 MFR의 동작 흐름도

Fig. 1. The flow diagram of the shipborne MFR.

표 1. 표적 유형별 특성 정보

Table 1. The characteristics of the targets.

Target type	Missile	Airplane	Ship
Velocity(m/s)	150~350	250~500	0~50
Elevation(m)	2~50	500~5,000	2~10
Threat	High	Medium	Low

행할 수 있다. 감시 임무 수행 중 표적 반사 신호가 수신되면 표적이 출현한 것으로 간주하고, 표적 정보를 획득한다. 이때, 표적의 거리 정보는 정합 필터링(matched filtering)으로부터 생성된 High Resolution Range Profile(HRRP)을 통해 얻을 수 있으며<sup>[8]</sup>, 속력 정보의 경우 첫 번째 스캔과 두 번째 스캔 사이의 표적 위치 정보를 비교하여 얻을 수 있다. 또한, 표적의 방위각 정보는 탐색 빔의 송신 방위각으로부터 직접적으로 얻을 수 있고, 고각 정보는 수신 빔을 고속 푸리에 변환(fast Fourier transform: FFT)하여 획득할 수 있다<sup>[9]</sup>.

함정용 MFR이 고려해야 하는 표적은 대함 미사일, 항공기, 함정의 세 가지로 구분할 수 있으며, 각 표적의 특성은 표 1과 같다. 세 종류의 표적 중 함정 표적은 비교적 속력이 느리고 MFR 플랫폼에 대한 위협도가 낮기 때문에 탐색 빔으로만 표적에 대한 정보를 획득하여도 무방한 반면, 대함 미사일 및 항공기 표적에 대해서는 추적 빔을 할당하여 보다 정확하고 신속한 표적 정보 획득이 이루어져야 한다. 그러나 탐색 임무를 통해 표적의 정보를 획득하더라도 표적의 구체적인 종류를 확인할 수는 없다. 따라서 표적 우선순위 할당을 통해 표적의 위협도를 판단해야 하며, 이를 위해 속력과 고도 정보로부터 표적의 우선순위를 할당하는 퍼지 논리 알고리즘을 이용한다.

다음으로, 우선순위 할당 결과에 따라 높은 우선순위를 가지는 표적에 대해서는 추적 임무가 할당되며, 현재 MFR에 할당된 탐색 및 추적 임무의 순서를 합리적으로 결정하기 위하여 빔 스케줄링 알고리즘이 사용된다. 추적은 탐색 빔으로부터 얻어진 표적의 대략적인 위치 정보를 바탕으로 해당 위치에 폭이 좁은 펜슬 빔(pencil beam)을 방사하여 표적의 자세한 정보를 얻는 과정이다. 추적 임무가 수행되면 해당 표적에 대한 정보가 갱신되며, 새로운

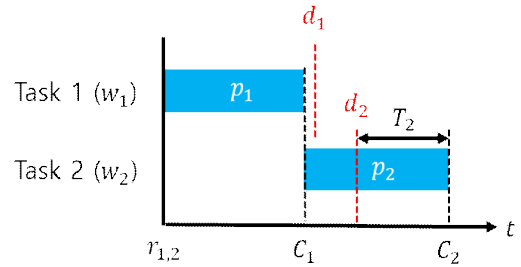


그림 2. Job shop 스케줄링 임무 구성 요소

Fig. 2. The task components of job shop scheduling.

정보를 바탕으로 다시 표적 우선순위 할당 이하의 과정을 반복한다.

## 2.2 다기능 레이다 임무 스케줄링

Job shop 스케줄링 이론에서 하나의 임무  $j$ 는 그림 2와 같이 중요도(weight,  $w_j$ ), 발생 시간(release time,  $r_j$ ), 처리 시간(processing time,  $p_j$ ), 마감 시간(due time,  $d_j$ )으로 정의된다. 또한, 임무가 완료되는 시점인 종료 시간(completion time,  $c_j$ )이 마감 시간을 초과한 경우, 해당 임무는 지연된 것으로 여겨지며, 다음과 같이 지연 시간(tardiness,  $T_j$ )이 발생한다.

$$T_j = \max(0, c_j - d_j) \quad (1)$$

일반적으로 모든 임무는 마감 시간 이전에 완료되는 것이 이상적이지만, 많은 수의 임무가 동시에 발생하는 경우, 모든 임무를 마감 시간 안에 처리하는 것이 불가능할 수 있다. 이러한 경우 중요한 표적을 우선적으로 처리해야 하며, 이를 나타내는 지표로 tardiness의 가중 합계에 해당하는 TWT를 이용할 수 있다.

$$TWT = \sum_{j=1}^N w_j T_j \quad (2)$$

위 식에서  $N$ 은 총 임무의 수를 의미하며, 이러한 TWT는 레이다 임무 스케줄링 평가 측면에서 유용한 성능 지표임이 알려져 있다<sup>[6],[7]</sup>.

앞서 설명한 job shop 스케줄링 이론은 MFR의 임무를 모델링하는 데 매우 유용하지만, 함정용 MFR의 감시 및 추적 임무는 한 번 수행하면 종료되는 job shop 스케줄링

에서의 임무와 다른 특성이 존재하여 이에 대한 고려가 필요하다. 먼저, 감시 임무는 MFR의 폭이 2°인 빔을 이용하므로 180개의 탐색 빔이 방사된 후 전 방위에 대한 스캔이 완료되는데, 이를 하나의 프레임(frame)으로 하여 전 방위를 한 번 스캔하는 데 소요되는 시간을 프레임 시간으로 정의한다. 일반적으로 모든 영역에 대한 감시를 위하여 합정용 MFR에서는 다른 임무를 수행하지 않을 때 감시 임무를 상시 수행하며, 프레임 시간을 일정 값 이하로 유지해야 한다.

또한, 탐지된 표적을 향해 추적 빔을 송·수신하면 해당 표적에 대한 구체적인 정보를 얻을 수 있다. 그러나 합정용 MFR의 추적 대상에 해당하는 미사일 및 항공기 표적은 끊임없이 빠른 속도로 이동하여 위치 정보가 변화하므로 하나의 표적에 대한 추적 임무를 지속적으로 수행해야 한다. 이때, 현재 표적이 존재하는 위치를 예측하여 추적 빔을 방사하기 위하여 칼만 필터(Kalman filter)를 이용하는데, 추적 빔 사이의 시간 간격이 지나치게 넓으면 실제 위치 값과 칼만 필터의 추정 값 사이의 오차가 커져, 추적 빔을 표적의 위치에 정확히 방사할 수 없다. 따라서 추적 임무는 표적 탐지 후 즉시 할당되며,  $t_i$ 의 제한 시간을 가지는 것으로 정의한다. 즉, 추적 임무에 대한 마감 시간이 다음과 같이 결정된다.

$$d_i = r_i + t_i \quad (3)$$

또한, 하나의 추적 빔에 대한 처리가 완료된 직후 해당 표적에 대한 추적을 유지하기 위해 다시 동일 표적에 대한 추적 임무가 할당되고, 새로운 추적 임무도 마찬가지로  $t_i$  이내에 수행되어야 지연되지 않은 것으로 간주된다.

앞서 언급한 바와 같이 표적의 수가 많은 경우, 모든 표적에 대하여 추적 임무를 지연시키지 않고 수행하는 것은 불가능하다. 이러한 경우, 중요도가 높은 표적에 대한 추적을 먼저 수행하는 것이 합리적이며, 중요 표적을 추적하는 데 충분한 시간을 확보하기 위해 비교적 중요도가 낮은 표적에 대한 추적을 처리하지 않는 선택이 가능하다. 이와 같이 한 프레임 동안 탐지된 대함 미사일 및 항공기 표적 중 추적 빔이 한 번도 할당되지 않은 표적은 드랍아웃된 것으로 표현한다. 본 논문에서는 스케줄링 알고리즘을 TWT, 평균 프레임 시간, 프레임마다 드랍아웃된 표적 수

의 세 가지 지표를 바탕으로 비교하여 감시 및 추적 임무 측면에서 알고리즘의 효율성을 분석한다.

## 2.3 휴리스틱 스케줄링 알고리즘

본 절에서는 합정용 MFR 빔 스케줄링에 적용할 몇 가지 휴리스틱 스케줄링 알고리즘을 소개한다. 먼저, Earliest Due Date(EDD) 알고리즘은 현재 시간  $t$ 로부터 마감 시간이 가까운 임무부터 수행하는 알고리즘이다. WEDD 알고리즘은 이러한 EDD 알고리즘에 임무의 중요도를 추가적으로 고려한 것으로, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$WEDD_j(t) = \frac{d_j - t}{w_j} \quad (4)$$

WEDD 알고리즘에서는 각 임무마다 위의  $WEDD_j$  값을 계산하여 해당 값이 작은 임무부터 수행한다.

Modified Due Date(MDD) 알고리즘은 현재 시간  $t$ 에서 임무  $j$ 의 마감 시간과 예상 완료 시간을 다음과 같이 비교한다.

$$MDD_j(t) = \max(t + p_j, d_j) \quad (5)$$

그러나 MDD 알고리즘에서는 임무의 중요도가 고려되지 않으며, 임무의 중요도를 추가적으로 고려하여 MDD 알고리즘을 개선시킨 WMDD는 다음과 같이 계산된다.

$$WMDD_j(t) = \frac{\max(p_j, d_j - t)}{w_j} \quad (6)$$

위와 같이 계산한  $WMDD_j$  값을 비교하여 WMDD가 가장 낮은 임무부터 순서대로 처리한다.

다음으로, MS 알고리즘에서 고려하는 여유 시간(slack,  $s_j$ )이란 처리 시간을 고려했을 때 임무를 마감 시간 이전에 완료할 수 있는 시간을 의미하며, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$s_j(t) = d_j - (t + p_j) \quad (7)$$

MS 알고리즘에서는 여유 시간이 작을수록 급하게 처리해야 할 임무로 판단하여 우선적으로 처리한다.

마지막으로, ATC 알고리즘은 여유 시간과 함께 임무의 중요도와 처리 시간을 모두 고려하여 아래와 같이 처리

순서를 결정한다.

$$ATC_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K\bar{p}}\right) \quad (8)$$

위 식에서  $\bar{p}$ 는 평균 처리 시간,  $K$ 는 스케일링 파라미터를 의미하며,  $K$ 의 값이 클수록 임무의 중요도를 더 많이 반영하고, 작을수록 여유 시간을 많이 반영하게 된다. 이렇게 계산된  $ATC_j$  값을 비교하여  $ATC_j$ 가 가장 큰 임무부터 처리한다.

### III. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 함정용 MFR 주변에 다수의 표적이 존재하는 상황에 대한 시나리오를 생성하고, 휴리스틱 알고리즘을 적용하여 탐색 및 추적 빔에 대한 스케줄링을 수행한다. 감시와 추적 임무 모두 하나의 빔에 대한 처리 시간  $p_t$ 를 10~20 ms로 가정하였으며<sup>[10]</sup>, 추적 임무의 제한 시간  $t_t$ 는 2초로 설정하여 추적 임무가 할당된 후 2초 안에 수행되지 않으면 지연 시간이 발생하도록 하였다. 추가적으로, 스케줄링 시 프레임 시간이 10초를 초과하는 경우, 한 구역에 대한 감시가 너무 오랫동안 이루어지지 않으므로 감시 임무가 제대로 이루어지지 않는 것으로 판단하였다. 휴리스틱 알고리즘을 평가하기 위한 시나리오는 존재하는 표적의 수에 따라 구분하여 각각 30개, 100개의 표적이 레이더 주변  $\pm 25$  km 안에서 표 1의 표적 특성에 따라 임의의 위치에 생성되고, 임의의 방향으로 등속도 운동을 하는 것으로 설정하였다. 시나리오에 따른 표적 생성 결과는 그림 3에 나타나 있다.

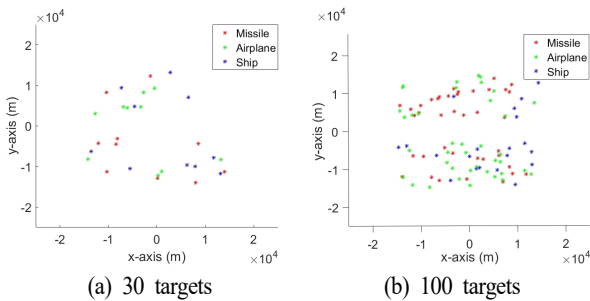
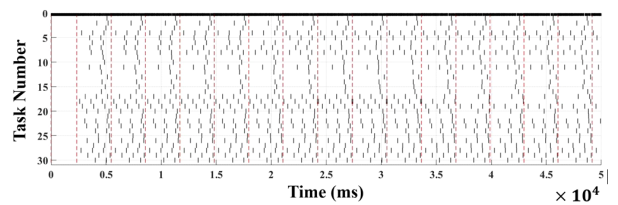


그림 3. 시나리오별 표적 생성 결과

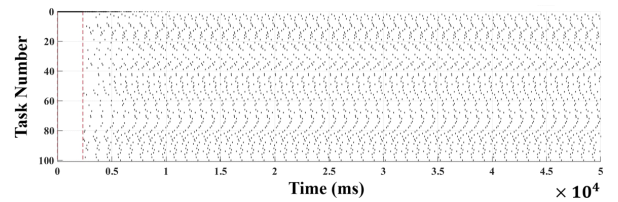
Fig. 3. The results of target generation.

먼저, MFR 주변에 미사일, 항공기, 함정 표적이 각각 10개씩 총 30개의 표적이 출현하고, WEDD 알고리즘을 적용하여 스케줄링한 결과는 그림 4의 스케줄링 표(a)와 같다. 스케줄링 표에서 가로축은 시간, 세로축은 초기에 생성한 표적의 번호를 지정하여 미사일은 1~10번, 항공기는 11~20번, 함정 표적은 21~30번으로 하였고, 탐색 빔을 처리한 경우 0번으로 기록하였다. 그리고 프레임의 시작을 붉은 점선으로 나타내었으며, 빔이 할당된 경우 해당되는 시간 및 임무 번호에 따라 스케줄링 표에 표시하였다. 이를 바탕으로 스케줄링 표를 살펴보면, 첫 번째 프레임에서는 탐색 임무만 수행하고, 두 번째 프레임부터 탐색 빔에 의해 표적이 탐지되는 순서대로 추적 임무가 할당되어, 해당 표적에 대한 추적 빔이 처리되는 것을 확인할 수 있다. WEDD 알고리즘을 이용하는 경우, 미사일 및 항공기 표적뿐만 아니라, 우선순위가 낮은 함정 표적에 대해서도 추적 빔이 할당되는데, 이는 식 (4)에서 우선순위가 0에서 1 사이의 값을 가지는 반면, 현재 시간이 마감 시간을 초과하면 분자의  $d_j - t$ 가 0보다 작아져 우선순위가 낮은 표적도 매우 낮은  $WEDD_j$  값을 가지기 때문이다. 따라서 WEDD 알고리즘을 이용하여 빔 스케줄링을 수행하면 표적의 우선순위와 관계없이 일정한 주기로 모든 표적을 추



(a) 표적 수: 30(미사일 10, 항공기 10, 함정 10)

(a) 30 targets(10 missiles, 10 aircraft, 10 ships)



(b) 표적 수: 100(미사일 40, 항공기 40, 함정 20)

(b) 100 targets(40 missiles, 40 aircraft, 20 ships)

그림 4. WEDD 스케줄링 결과

Fig. 4. WEDD scheduling results.

적하게 된다.

그림 4(b)는 미사일(표적 번호 1~40) 및 항공기(표적 번호 41~80) 표적이 각각 40개, 함정 표적(표적 번호 81~100)이 20개로 총 100개의 표적을 WEDD 알고리즘으로 스케줄링한 결과이다. 위에서 설명한 것과 마찬가지로 모든 표적에 대하여 주기적으로 추적 빔을 할당하는 것을 확인할 수 있으며, 그 결과 지나치게 많은 표적에 추적 빔이 할당되어 탐색 빔을 처리할 시간이 부족하게 된다. 따라서 프레임 시간이 10초를 초과하여 매우 길어지고, 감시 임무가 제대로 수행되지 않으므로 MFR 주변에 많은 표적이 존재하는 경우에는 WEDD 알고리즘을 이용한 빔 스케줄링이 불가능한 것으로 판단된다.

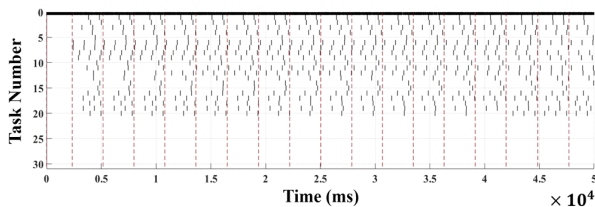
다음으로, WMDD 알고리즘을 이용한 스케줄링 결과는 그림 5와 같이 나타났으며, 그림 5(a)는 30개의 표적에 대한 빔 스케줄링을 수행한 결과이다. WMDD 알고리즘은 WEDD 알고리즘을 이용하여 스케줄링했을 때와 달리 감시 임무의 우선순위가 낮은 표적에 대해서는 추적 빔을 할당하지 않는다. 따라서 위협도가 낮은 함정 표적의 우선 순위보다 높게 감시 임무의 우선순위를 설정함으로써 함정 표적에 대한 추적 임무를 수행하지 않는 것이 가능하였다.

마찬가지로 100개의 표적이 존재하는 환경에서 WMDD

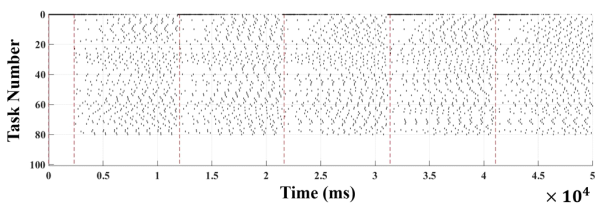
알고리즘을 이용하여 빔 스케줄링을 수행하였으며, 그 결과는 그림 5(b)와 같았다. 우선순위가 낮은 함정 표적(81~100)에 대하여 추적 빔을 처리하지 않는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인하여 탐색 빔을 처리할 수 있는 충분한 시간이 확보되고, 추가적으로 프레임 제한 시간에 가까워진 경우, 감시 임무의 우선순위를 증가시켜 한 프레임을 10초 이전에 종료할 수 있었다. 따라서 감시 임무가 올바르게 수행되므로 다수의 표적이 존재하는 경우에도 WMDD 알고리즘을 이용하면 합리적인 빔 스케줄링이 가능한 것으로 생각된다.

그림 6은 MS 알고리즘을 이용하여 빔 스케줄링을 수행한 결과이다. 식 (7)에서 알 수 있는 바와 같이, MS 알고리즘은 다른 알고리즘과 달리 임무의 중요도를 고려하지 않는다. 따라서 모든 임무를 제한 시간에 따라 주기적으로 처리하게 되며, 전체적으로 WEDD 알고리즘을 이용한 빔 스케줄링과 유사한 결과가 나타났다. 마찬가지로 100개의 표적이 존재하는 시나리오에서도 프레임이 진행되며, 많은 표적에 대해 추적 임무가 할당된 후 감시 임무가 제대로 수행되지 않았다(그림 6(b)).

마지막으로, ATC 알고리즘을 이용한 빔 스케줄링 결과는 그림 7과 같았다. 스케일링 파라미터  $K$ 는 0.1로 설정하

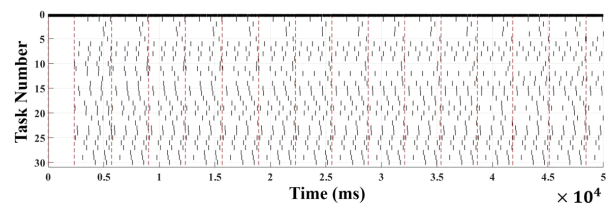


(a) 표적 수: 30(미사일 10, 항공기 10, 함정 10)  
(a) 30 targets(10 missiles, 10 aircraft, 10 ships)

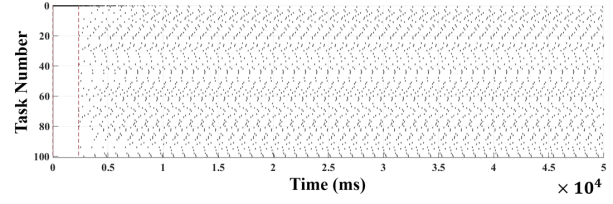


(b) 표적 수: 100(미사일 40, 항공기 40, 함정 20)  
(b) 100 targets(40 missiles, 40 aircraft, 20 ships)

그림 5. WMDD 스케줄링 결과  
Fig. 5. WMDD scheduling results.

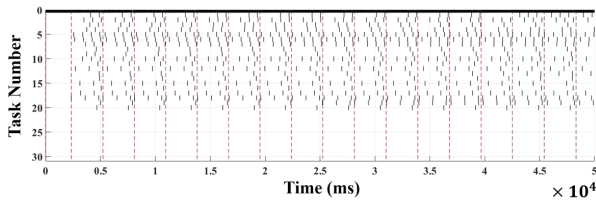


(a) 표적 수: 30(미사일 10, 항공기 10, 함정 10)  
(a) 30 targets(10 missiles, 10 aircraft, 10 ships)

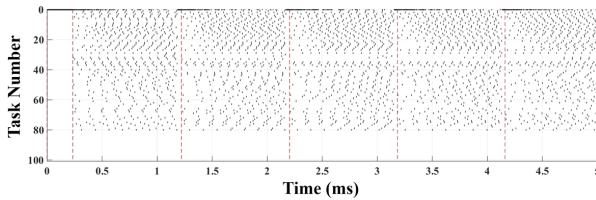


(b) 표적 수: 100(미사일 40, 항공기 40, 함정 20)  
(b) 100 targets(40 missiles, 40 aircraft, 20 ships)

그림 6. MS 스케줄링 결과  
Fig. 6. MS scheduling results.



(a) 표적 수: 30(미사일 10, 항공기 10, 함정 10)  
(a) 30 targets(10 missiles, 10 aircraft, 10 ships)



(b) 표적 수: 100(미사일 40, 항공기 40, 함정 20)  
(b) 100 targets(40 missiles, 40 aircraft, 20 ships)

그림 7. ATC 스케줄링 결과  
Fig. 7. ATC scheduling results.

였으며, WMDD 알고리즘을 이용한 스케줄링과 유사하게 ATC 알고리즘에서도 함정 표적보다 감시 임무의 우선순위를 높게 설정하여 함정 표적에 대한 추적 빔을 처리하지 않을 수 있었다. 따라서 100개의 표적이 탐지되는 시나리오에서도 감시 임무를 원활하게 수행하여 하나의 프레임에 대략 10초 정도의 시간이 소요되었다(그림 7(b)). 그러나 WMDD 알고리즘이 감시 임무보다 높은 우선순위를 가지는 모든 표적에 대하여 일정한 추적 주기를 가지고 빔을 할당하는 반면, ATC 알고리즘은 우선순위가 높은 표적일수록 더 자주 추적 빔을 할당하였다. 이는 그림 7(a)에서 미사일 표적(표적 번호 1~10)과 항공기 표적(표적 번호 11~20)의 추적 빔 사이 간격을 통해 확인할 수 있다.

각 시나리오별 알고리즘에 따른 프레임 시간, TWT, 드랍아웃된 표적 수를 측정한 결과, 그림 8~그림 10과 같이 나타났다. 모든 시나리오 및 알고리즘에 대해 독립적으로 50회 시뮬레이션한 결과의 평균값을 이용하였으며, WEDD와 MS 알고리즘의 경우, 100개의 표적이 존재하는 시나리오에 대한 빔 스케줄링이 불가능하여 각 지표에 대한 결과를 얻을 수 없었다. 먼저, 그림 8에서 30개의 표적에 대한 스케줄링을 수행하는 경우 WEDD와 MS 알고리즘은 대략 3.20초, WMDD와 ATC 알고리즘은 대략 2.87초의 프레임

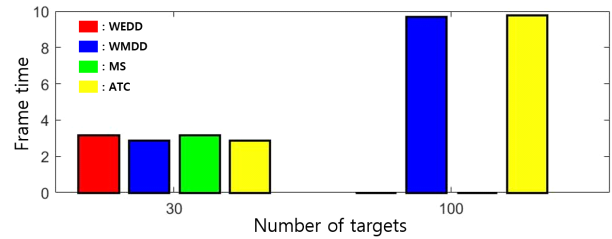


그림 8. 알고리즘별 프레임 시간  
Fig. 8. Frame time.

시간을 가지는 것을 확인할 수 있다. WMDD와 ATC 알고리즘의 경우, 우선순위를 바탕으로 비교적 중요하지 않은 함정 표적을 구분하여 추적 빔을 할당하지 않음으로써 WEDD와 MS 알고리즘에 비해 프레임 시간을 단축시킬 수 있는 것으로 분석된다. 또한, 100개의 표적에 대해 WMDD와 ATC 알고리즘을 이용하여 스케줄링 시 프레임 시간이 각각 9.70초와 9.78초로 유사한 프레임 시간을 가지며, 정해진 10초의 프레임 제한 시간 안에 감시 임무를 완료할 수 있음이 확인되었다.

다음으로, 그림 9와 그림 10의 결과에서 볼 수 있는 것과 같이, 어떤 알고리즘을 이용하더라도 30개의 표적이 존

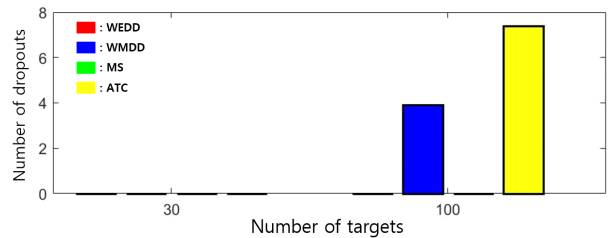


그림 9. 알고리즘별 드랍아웃 표적 수  
Fig. 9. The number of targets dropped out.

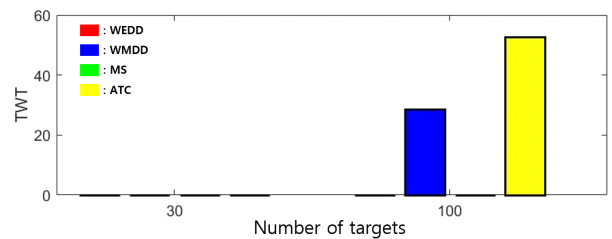


그림 10. 알고리즘별 총 가중 지연 시간  
Fig. 10. Total weighed tardiness.

재하는 시나리오에서는 TWT와 추적 임무 시 표적의 드랍아웃이 발생하지 않았다. 그러나 100개의 표적이 존재하는 경우, WMDD 알고리즘은 3.93개, ATC 알고리즘은 7.39개 가량의 드랍아웃 표적이 발생하였고, TWT는 각각 28.7050, 52.7714로 측정되었다. 이는 WMDD 알고리즘이 추적 임무를 할당하는 모든 표적에 대하여 동일한 추적 주기를 설정하는 반면, ATC 알고리즘은 레이더가 우선순위가 높은 표적을 더 자주 추적하도록 하여 드랍아웃되는 표적의 수가 많아지고, 드랍아웃된 표적은 프레임 종료까지 지연된 것으로 여겨지므로 그에 따라 드랍아웃된 표적 수가 많은 ATC 알고리즘의 TWT가 증가하는 것으로 분석된다.

따라서 프레임 시간, TWT, 드랍아웃 표적 수를 종합적으로 고려하면, 30개의 표적이 존재하는 경우, 모든 알고리즘이 합리적인 스케줄링을 수행할 수 있었다. 그러나 100개 정도로 다수의 표적이 존재하는 경우에는 WMDD 알고리즘과 ATC 알고리즘만 제한된 프레임 시간 내에 스케줄링이 가능하였으며, TWT와 드랍아웃 표적 측면에서 분석한 결과 WMDD 알고리즘이 함정용 MFR의 빔 스케줄링에 다소 유리한 것으로 나타났다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 해상 환경을 감시하고, 다중 표적 추적을 수행하는 함정용 MFR을 모델링하며 MFR의 자원을 효율적으로 관리하기 위하여 WEDD, WMDD, MS, ATC의 네 가지 스케줄링 알고리즘을 구현하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 표적의 수에 따라 시나리오를 구분하여 각 알고리즘의 스케줄링 결과를 분석하였고, 그 결과 일정 이하의 표적에 대해서는 모든 알고리즘을 이용하여 빔 스케줄링이 가능하지만, 다수의 표적이 존재하는 경우에는 프레임 제한 조건으로 인하여 WMDD 및 ATC 알고리즘으로만 합리적인 스케줄링이 가능함을 보였다. 추가적으로 TWT 및 드랍아웃 표적의 수 측면에서도 각 알고리즘의 성능을 비교하여 WMDD 알고리즘이 가장 효율적인 스케줄링을 수행하는 것을 확인할 수 있었다. 향후 연구에서는 현재의 휴리스틱 알고리즘에서 벗어나 MFR 빔 스케줄링 문제에 대한 최적해를 찾을 수 있는 방안을 고안하여 보다 향상된 스케줄링 성능을 얻을 수 있도록 할 것이다.

#### References

- [1] Z. Ding, "A survey of radar resource management algorithms," in *2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Niagara Falls, ON, 2008, pp. 001559-001564.
- [2] S. L. C. Miranda, K. Baker, K. Woodbridge, and H. D. Griffiths, "Fuzzy logic based for prioritisation of radar tasks and sectors of surveillance in multifunction radar," *IET Radar Sonar & Navigation*, vol. 1, no. 2, pp. 131-141, Apr. 2007.
- [3] V. Krishnamurthy, R. J. Evans, "Hidden Markov model multiarm bandit: A methodology for beam scheduling in multitarget tracking," *IEEE Transactions on Signal Process*, vol. 49, no. 2, pp. 2893-2908, Dec. 2001.
- [4] N. H. Jeong, S. H. Lee, M. S. Kang, C. W. Gu, C. H. Kim, and K. T. Kim, "Target prioritization for multifunction radar using artificial neural network based on steepest descent method," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 1, pp. 68-76, 2018.
- [5] L. P. Michael, *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, 3rd ed. Dordrecht, Springer, 2008.
- [6] S. J. Jeong, D. S. Jang, H. L. Choi, and J. H. Yang, "Task scheduling and multiple operation analysis of multifunction radars," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 42, no. 3, pp. 254-262, 2014.
- [7] Y. J. Park, S. S. Park, W. C. Lee, H. L. Choi, E. H. Kim, and J. E. Roh, "Adaptive radar task scheduling algorithm considering the target priority," in *2017 KSAS (Korean Society for Aeronautical & Space Sciences) Fall Conference*, 2017, pp. 286-287.
- [8] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, 3rd ed. Raleigh, NC, Scitech, 2014.
- [9] P. Stoica, R. L. Moses, *Introduction to Spectral Analysis*, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1997.
- [10] X. Guangran, R. Zicheng, W. Wei, and H. Lang, "Multi-

beam dwell adaptive scheduling algorithm for helicopter-borne radar," in *2014 IEEE 7th Joint International*

*Information Technology and Artificial Intelligence Conference*, Chongqing, 2014, pp. 401-404.

정 남 훈 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1629-2418>



2015년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

2018년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2018년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상,

레이더 자원관리

김 철 호 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2915-5757>



1997년 2월: 포항공과대학교 전자계산학과 (공학사)

2004년 2월: 한국과학기술원 전산학과 (공학석사)

2006년~현재: 국방과학연구소 연구원  
[주 관심분야] 전투체계, 소프트웨어 공학, 추적 필터, 레이더 자원관리, 인공지능

능 등

진 승 현 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6701-7806>



2017년 2월: 부산대학교 전기공학과 (공학사)

2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2019년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 레이더 신호처리 및 영상,

레이더 자원관리

김 경 태 [포항공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)

1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전

자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장

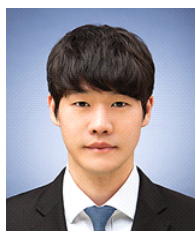
2018년 1월~현재: 무인 감시정찰기술연구 센터장

2019년 4월~현재: 차세대 영상레이더 시스템 연구 센터장

[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정 등

최 재 호 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9484-4869>



2017년 2월: 고려대학교 컴퓨터·통신공학부 (공학사)

2019년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2019년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 레이더 신호처리 및 영상,

휴먼 탐지, 미세도플러 분석